



AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Metali Nieżelaznych
Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych
dr hab. inż. Krzysztof Żaba, prof. AGH

Kraków, 05 lutego 2024 r.

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Wojtyczki pt. „Opracowanie technologii
wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatych przekładni
lotniczej silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear 53 i pracujących w warunkach
długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeń eksploatacyjnych”,
opracowana na zlecenie Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz,
pismo z dnia 15 listopada 2023**

Praca przedstawia aktualne zagadnienia i problemy dotyczące przemysłu lotniczego. Rozwój i ciągła modyfikacja jednostek napędowych, wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, wymusza doskonalenie i opracowywanie nowych konstrukcji z wykorzystaniem odpowiednich materiałów oraz technologii. Niezawodność produktów i restrykcyjne wymogi obowiązujące w przemyśle lotniczym, uzyskanie konkurencyjnych cen oraz skrócenie czasu dostawy obliguje proces wytwórczy do ciągłego rozwoju i prowadzenia nowoczesnych badań. Zaznaczyć należy, że w pracy podjęto tematykę nową, dotyczącą wysokociśnieniowego hartowania gazowego HPQG, która dotychczas nie była stosowana w produkcji przekładni silników lotniczych.

Autor rozprawy podjął próbę opracowania technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatych przekładni lotniczych silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear 53, pracujących w warunkach długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeniach eksploatacyjnych. Wykonane badania były ukierunkowane na określenie parametrów technologicznych dla połączenia dwóch procesów tj. niskociśnieniowego nawęglania próżniowego LPC z wysokociśnieniowym hartowaniem gazowym HPGQ. Uzyskane wyniki stanowią podstawę certyfikacji technologii produkcji i kształtowania własności użytkowych kół zębatych wykonanych ze stali Pyrowear 53 w produkcji lotniczej firmy Pratt & Whitney Rzeszów S.A. Ponadto uzyskane wyniki badań mogą stanowić bazę do dalszego doskonalenia technologii kształtowania elementów konstrukcji przemysłu lotniczego. Autor rozprawy podjął tematykę badawczą, po której proces technologiczny powinien charakteryzować się niższymi kosztami wytwarzania w porównaniu do konwencjonalnego procesu nawęglania gazowego i hartowania w oleju poprzez m.in. eliminację operacji piaskowania, oksydacji w procesie nawęglania, miedziowania i mycia w operacji hartowania, skróceniem procesu technologicznego poprzez zastosowanie bezpośredniego hartowania po procesie niskociśnieniowego nawęglania próżniowego oraz brakiem bądź ograniczeniem emisji CO₂ do atmosfery a także wysokim poziomem stabilności, powtarzalności.

Problematyka i temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Wojtyczki zostały sformułowane poprawnie i zasługują na uznanie. Wybór tematyki jest aktualny i wpisuje się w trendy badawcze dotyczące modyfikacji, polepszania procesów technologicznych poprzez połączenie nawęglania próżniowego LPC z wysokociśnieniowym hartowaniem gazowym HPGQ.

Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa, napisana pod opieką naukową dr hab. inż. Marcina Drajewicza prof. PRz, obejmuje 171 stron. Składa się z 8 rozdziałów, wniosków końcowych, bibliografii oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca zawiera 141 rysunków w postaci schematów, wykresów i fotografii oraz 37 tabel i 126 pozycji literaturowych z czego 11 z nich jest z ostatnich dziesięciu lat.

Część I dysertacji, obejmuje „Wprowadzenie” (rozdział 1, strony 8-10) oraz „Studium Literatry” (rozdział 2, strony 11-33). W rozdziale drugim, podzielonym na dziewięć podrozdziałów, autor przedstawia charakterystykę procesu nawęglania oraz procesy obróbki cieplnej następujące po nim. Skupia się również na dokładnym opisie niskociśnieniowego nawęglania próżniowego oraz wysokociśnieniowego hartowania gazowego. W kolejnym trzecim rozdziale autor opisuje wymagania technologiczne stawiane warstwie nawęglanej. Uważam, że rozdział ten powinien być podrozdziałem „Studium Literatrurowego”, ponieważ jest kontynuacją opisywanego w rozdziale drugim procesu nawęglania.

Analiza literaturowa, dotycząca rozdziału drugiego oparta jest w większości o publikacje anglojęzyczne. Została wykonana poprawnie, obejmując najważniejsze zagadnienia dotyczące tematyki podjętej w pracy. Wątpliwości może wzbudzać powoływanie się na publikacje sięgające nawet 20 lat wstecz, które stanowią znaczną część pozycji literaturowych.

Opis teoretyczny wynikający z analizy literaturowej jest obszerny, opisany w sposób poprawny i wyjaśniający zagadnienia związane z pracą.

Doktorant, w rozdziale czwartym dysertacji, podsumowuje stan zagadnienia, przedstawia cel, tezę oraz określa zakres pracy (str. 41-42). Według Doktoranta dobór parametrów procesu nawęglania próżniowego i wysokociśnieniowego hartowania gazowego pozwoli na „Opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatych przekładni lotniczej silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear 53 i pracujących w warunkach długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeń eksploatacyjnych”.

Celem pracy jest „Opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego wraz z jej certyfikacją w warunkach przemysłowych na kołach produkcyjnych przekładni planetarnej FDGS wykonanych ze stali Pyrowear 53.

Cel pracy, według Autora, powinien zostać osiągnięty, a teza udowodniona, poprzez realizację badań obejmujących:

- teoretyczną analizę procesu nawęglania, ze szczególnym uwzględnieniem nawęglania próżniowego,
- teoretyczną analizę procesu hartowania, ze szczególnym uwzględnieniem hartowania w ośrodkach gazowych,
- wytworzenie warstw nawęglonych na podłożu stali Pyrowear 53 ze zmianą zastosowanych parametrów hartowania gazowego (wpływ ciśnienia gazu hartowniczego),

- wytworzenie warstw nawęglonych na podłożu stali Pyrowear 53 ze zmianą zastosowanych wariantów obróbki cieplnej,
- analiza zastosowanych procesów technologicznych w warunkach produkcyjnych,
- opracowanie i certyfikacja procesu technologicznego wykorzystującego proces wysokociśnieniowego hartowania gazowego do uzyskania odpowiednich parametrów konstrukcyjnych kół zębatych z materiału Pyrowear 53 przekładni planetarnej FDGS.

Sformułowany cel i teza są właściwe i jednoznacznie określają istotę rozprawy.

Część II dysertacji, obejmująca badania własne została podzielona na cztery rozdziały (5-8), zawarte na stronach 43-139.

Zasadniczy zakres badań został podzielony na 3 etapy. W pierwszym etapie badano wpływ prędkości chłodzenia (ciśnienia gazu hartowniczego), oraz czasu austenitzowania na własności mikrostruktury warstwy i rdzenia. Autor podkreśla, że proces nawęglania próżniowego oraz hartowania gazowego z temperatury austenitzacji został przeprowadzony w piecu próżniowym Politechniki Rzeszowskiej. Pozostała obróbka cieplna wykonana została na urządzeniach firmy Pratt Whitney Rzeszów S.A.

Drugi etap obejmował wpływ różnych wariantów obróbki cieplnej po procesie nawęglania próżniowego na skład fazowy i morfologię składników mikrostruktury warstwy wierzchniej i rdzenia oraz własności wytrzymałościowe segmentów kół ze stali Pyrowear 53. Również na tym etapie Autor zaznacza, że proces niskociśnieniowego nawęglania próżniowego wykonano na piecu próżniowym Politechniki Rzeszowskiej natomiast obróbkę cieplną wykonano w firmie Pratt Whitney Rzeszów S.A.

Trzeci etap obejmował wykonanie procesu nawęglania próżniowego z wariantem hartowania gazowego z temperatury austenitzacji i hartowania gazowego z temperatury nawęglania dla kół produkcyjnych na Pratt Whitney Rzeszów S.A. Ta część badań została wykonana przy pełnym obciążeniu komory pieca (18 kół zębatych) celem porównania uzyskanych wyników z obecnie obowiązującym procesem technologicznym w cyklu produkcyjnym w firmie Pratt Whitney Rzeszów S.A.

Po weryfikacji procesów technologicznych przeprowadzonych w warunkach produkcyjnych, do ostatecznego etapu certyfikacji wybrano proces nawęglania próżniowego z bezpośrednim hartowaniem z temperatury nawęglania. Parametry procesu mają stanowić podstawę do wprowadzenia odpowiednich zmian i zatwierdzenia procesu hartowania gazowego i zapisów norm lotniczych w zakresie obróbki cieplnej kół zębatych.

W rozdziale piątym „Badania własne”, podrozdział 5.1 (str. 45-46) autor opisał, materiał wyjściowy do wykonania próbek badawczych. Materiał ten stanowiły półwyroby ze stali Pyrowear 53 w postaci prętów zgodnie z normą AMS 6308. Stal Pyrowear 53 poddano wstępnej obróbce cieplnej (ulepszanie cieplne - parametry przedstawiono w tabeli), której celem było uzyskanie jednorodnej, drobnoziarnistej mikrostruktury oraz uzyskanie odpowiedniej skrawalności materiału podczas operacji kształtowania geometrii zębów w obróbce mechanicznej.

Rozdział szósty „Metodyka badań”, podrozdział 6.1, zawiera opis procesu nawęglania próżniowego, wykonanego w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej na piecu próżniowym MonoTherm HK.446.VC.10.gr firmy ALD Vacuum Technology oraz nawęglania próżniowego w warunkach produkcyjnych realizowanego na piecu próżniowym MonoTherm HK.9912.VC.10.gr firmy ALD Vacuum Technology na wydziale obróbki cieplnej kół zębatych Pratt Whitney Rzeszów S.A. Rozdział ten przedstawia dokładny opis (wraz z parametrami) procesu nawęglania w obu wymienionych wyżej piecach. Oba procesy prowadzone były w takich samych warunkach dwustopniowego nagrzewania. Pierwszy etap prowadzony był w próżni do temperatury 600°C, drugi stopień prowadzony był w atmosferze azotu (0,15 MPa) do temperatury 921°C z prędkością nagrzewania 3 K/min.

Proces nawęglania próżniowego w piecu, stanowiącym zasoby Politechniki Rzeszowskiej, był prowadzony według dwóch „receptur”, różniących się ilością cykli oraz czasem. Proces nawęglania próżniowego w piecu Pratt Whitney Rzeszów prowadzony był według kolejnej trzeciej „receptury” różniącej się od 2 pozostałych ilością cykli i czasem nawęglania. Próbkę do nawęglania miały dwa różne wymiary (25mm średnicy i 100mm długości oraz 63mm średnicy i 100mm długości). Czym była spowodowana różnica w wielkości próbek do nawęglania i czy nie ma to wpływu na dalsze badania?

W kolejnym podrozdziale 6.2. Doktorant opracował metodykę obróbki cieplnej po procesie LPC. W pierwszej kolejności Autor skupił się na opisie procesów określających wpływ zastosowanego ciśnienia gazu hartowniczego oraz czasu austenitizacji na własności wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę warstwy i rdzenia. Proces nawęglania próżniowego obejmował 14 cykli w czasie 263 min. Różnicę stanowił czas autenitizacji (72 i 150 min) oraz ciśnienie gazu hartowniczego (1.5, 4, 9 bar).

Drugi etap zawiera opis metodyki badań dotyczących wpływu zastosowanego wariantu obróbki cieplnej na własności wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę warstwy i rdzenia. Proces nawęglania próżniowego obejmował 16 cykli i 345min. Obróbka cieplna obejmowała sześć wariantów, co zostało opisane i zobrazowane przez Doktoranta na schematach zamieszczonych w pracy.

W trzecim etapie pracy, określono wpływ zastosowanego wariantu obróbki cieplnej na własności mechaniczne oraz mikrostrukturę warstwy i rdzenia w warunkach produkcyjnych. W tym przypadku do badań wybrano kolejny, trzeci „wariant” nawęglania azotowego (24 cykle, 524 min) oraz dwa rodzaje obróbki cieplnej. W dalszej części Doktorant przedstawia parametry obróbki podzerowej oraz niskiego odpuszczania, które zostały przeprowadzone po procesie hartowania.

W rozdziale 7 „Badania własne”, podzielonym na pięć podrozdziałów przedstawiono informacje dotyczące metodyki badań mikrostrukturalnych (7.1, str. 66), badań własności wytrzymałościowych (7.2, str. 66-68), pomiaru stężenia węgla (7.3, str. 68-69), badań własności wytrzymałościowych stali Pyrowear 53 (7.4, str. 69-73) oraz badań naprężeni w warstwie wierzchniej (7.5, str. 74).

Badania mikroskopowe, zrealizowane z zastosowaniem mikroskopii optycznej, dotyczyły warstwy nawęglonej, warstwy pośredniej oraz rdzenia. Badania mikroskopowe pozwoliły Doktorantowi na określenie wielkości ziarna austenitu w rdzeniu. W pracy zaznaczono, że „Badania metalograficzne prowadzone były zgodnie z wymaganiami norm

lotniczych przeznaczonych do odbioru kół zębatach”. Podrozdział 7.2 „Badania własności wytrzymałościowych” zawiera opis metodyki badań dotyczącej pomiaru twardości. Dyplomata wyjaśnia w nim, zasadę pomiaru twardości próbek zębatach zgodnie z normą lotniczą PWA 11. Do opisu zamieszczony jest schemat, wyjaśniający metodykę pomiaru twardości. Podrozdział 7.3 obrazuje metodykę badań stężenia węgla metodą spektrometrii optycznej. Doktorat w sposób szczegółowy opisuje proces wykonanych badań, opierając się na normie ASTM E 415. W tym przypadku do badań zostały wykorzystane próbki proste o wymiarach 25x25x10mm. W rozdziale 7.4 określono metodykę badań wpływu prędkości chłodzenia oraz zastosowanego wariantu obróbki cieplnej na wartość parametrów wytrzymałościowych i plastycznych rdzenia kół zębatach w odniesieniu do tradycyjnego procesu hartowania stali Pyrowear 53 w oleju. Przy zachowaniu tych samych parametrów obróbki cieplnej po procesie hartowania (obróbki podzerowej oraz odpuszczania) uzyskano zestawienie parametrów wytrzymałościowych w zależności od zastosowanego ośrodka chłodzącego oraz intensywności chłodzenia. W tym celu Doktorat przeprowadził badania na segmentach, fragmentach koła produkcyjnego, co zostało zobrazowane na schemacie umieszczonym w pracy. Opisano przebieg próby rozciągania w temperaturze pokojowej oraz prób udarności. Ostatni podrozdział 7.5 dotyczy metodyki badawczej naprężeń własnych, które przeprowadzono na segmentach kół pierścieniowych przekładni planetarnej FDGS. Głębokość pomiaru naprężeń własnych została opracowana przez Autora zgodnie z wymaganiami normy odbiorczej dla kół zębatach pierścieniowych, słonecznych i satelitarnych. Badanie wykonano za pomocą dyfraktometru ProtiXRD.

Uważam, że wykorzystanie metod i aparatury użytej do wykonania badań, pozwoliło na kompleksową charakterystykę badanych materiałów.

Wyniki badań i ich analizę (rozdział 8, str. 77-148) podzielono na trzy podrozdziały, zgodne z etapami pracy opisanymi w metodyce badań. W podrozdziale 8.1 „Badanie wpływu czasu austenizacji i prędkości chłodzenia na własności wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę warstwy i rdzenia stali Pyrowear 53” (str. 77-90) przedstawiono wyniki badań mikrostrukturalnych oraz wyniki badań pomiaru twardości segmentów kół zębatach. Na podstawie zdjęć uzyskanych przy zastosowaniu mikroskopii optycznej, Autor stwierdza, że „zmiana schematu obróbki cieplnej, oraz zastosowanie różnych ciśnień gazu hartowniczego i wydłużenia czasu austenizacji nie wpływają na wystąpienie różnic w mikrostrukturze warstwy i rdzenia”. Według Doktoranta mikrostruktura jest zgodna z obecnie zatwierdzonym procesem obróbki cieplnej po nawęglaniu z wykorzystaniem hartowania w ośrodku olejowym. Wyniki badań twardości zostały przedstawione w postaci wykresów funkcji odległości od powierzchni podłoża. Obejmują krzywe rozkładu twardości oraz efektywność nawęglania zgodnie z normą lotniczą. Analiza wyników dwóch wariantów czasu austenizowania 72 min i 150 min pozwoliła Doktorantowi na wysunięcie wniosku iż, „2-krotne wydłużenie czasu austenizacji do procesu hartowania powoduje przyrost warstwy o ok 0,1 mm w stosunku do czasu austenizacji 72 min”. Ze względu na zwiększony czas w procesie austenizacji następuje dalszy proces dyfuzyjny i wzrost głębokości warstwy nawęglonej. Dlatego do dalszych procesów ze względu na uzyskane wyniki i wymagania normy PWA 11 Auto przyjął, że optymalny czas austenizacji powinien wynosić 72 min”.

Podrozdział 8.2 zatytułowany „Badanie wpływu zastosowanego wariantu obróbki cieplnej na mikrostrukturę warstwy i rdzenia” został podzielony na sześć podrozdziałów (strony 90-113). Podobnie jak w poprzednim rozdziale Doktorant przedstawia wyniki badań

mikrostrukturalnych dla sześciu różnych wariantów obróbki cieplnej, podsumowując tą część badań sformułowaniem, że „zastosowane parametry obróbki nie wpłynęły na różnice w mikrostrukturze warstwy i rdzenia. Jest ona zgodna z obecnie zatwierdzonym procesem obróbki cieplnej po procesie nawęglania z wykorzystaniem hartowania w ośrodku olejowym” Dalsza część badań dotyczy pomiaru wielkości ziarna rdzenia stali Pyrower 53 (rozdział 8.2.2 strony 97-99). Autor, powołując się na normę ASTM E 112 stwierdza, że zastosowane rodzaje obróbki cieplnej, według przyjętych parametrów technologicznych, nie powoduje rozrostu ziarna.

Podrozdział 8.2.3 „Własności mechaniczne” zawiera wyniki badań, dotyczące pomiaru twardości wraz z wyznaczeniem głębokości nawęglania na podstawie pomiarów twardości. Wyniki zobrazowane zostały w postaci wykresów rozkładu twardości w funkcji odległości od powierzchni oraz w formie zbiorczej tabeli, w której zamieszczono dane pomiarowe dotyczące twardości oraz efektywnej głębokości nawęglania. Podczas analizy wyników Doktorant wskazał na różnice w głębokości warstwy nawęglanej pomiędzy obszarem średnicy podziałowej zęba a średnicy stopy zęba. Autor wyjaśnia, że różnica ta wynika z oddziaływania strumienia atomów węgla z powierzchnią obu tych obszarów i jest to związane z geometrią koła zębatego. Po analizie wyników i porównaniu ich z wymaganiami technologicznymi, do dalszych procesów (etap 3) w celu optymalizacji procesu LPC+HPGQ w warunkach przemysłowych proces LPC został przeprowadzony wg „receptury C”, jednej z sześciu zaproponowanych rodzajów obróbki cieplnej.

Wyniki badań pomiaru stężenia węgla zostały zebrane w podrozdziale 8.2.4 (str.106-109) w postaci wykresów funkcji stężenia węgla od odległości od powierzchni. Badania wykonano przy użyciu optycznej spektrometrii emisyjnej. Doktorant opisuje również sposób przeprowadzonego badania i porównuje uzyskane wyniki stężenia węgla przeprowadzone bezpośrednio po procesie nawęglania oraz po obróbce cieplnej. Autor stwierdza, że „Uzyskanie odpowiedniej mikrostruktury warstwy nawęglanej stali Pyrowear 53 uwarunkowane jest od odpowiedniego poziomu stężenia węgla w warstwie i powinien on wynosić 0,7 – 0,9% C po pełnym procesie obróbki cieplnej”.

W dalszej części rozprawy Doktorat przedstawia wyniki badań zawartości austenitu szczątkowego (podrozdział 8.2.5, str. 110-113). Należy zaznaczyć, że badania te według normy PWA 79059, służą do weryfikacji badań mikrostrukturalnych. Przedstawione w tabeli 26 oraz na wykresach wyniki badań potwierdzają zawartość austenitu szczątkowego zgodną z normą odbiorczą PWA 79059. W zależności od zastosowanej obróbki cieplnej po procesie nawęglania próżniowego LPC, zawartość austenitu szczątkowego w warstwie i rdzeniu utrzymują się na jednakowym poziomie i spełnia wymagania zatwierdzonemu procesowi technologicznemu z hartowaniem w ośrodku olejowym. Ostatni podrozdział rozdziału 8 „Badania własności wytrzymałościowych” zawiera wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności, wysłużenia, udarność oraz twardości zestawione w tabeli. Na podstawie przedstawionych wyników, autor pracy wysuwa wniosek, że „Własności wytrzymałościowe w zależności od użytego schematu obróbki cieplnej nie wykazują różnic”. Dodatkowo stwierdza, że „uzyskane wartości są proporcjonalne do wartości parametrów otrzymanych przy tradycyjnym hartowaniu w ośrodku olejowym i są zgodnie z normami odbiorczymi i materiałowymi”. Autor przeprowadził dodatkowe badanie prędkości chłodzenia podczas hartowania w warunkach zbliżonych do warunków przemysłowych w celu określenia ostatecznej wartości prędkości chłodzenia w gazie. W tym celu

przeprowadzono hartowanie segmentów kół zębatach przy ciśnieniach 4 oraz 9 bar z dodatkowym obciążeniem 100 kg, ukierunkowane na zarejestrowania prędkości chłodzenia przy pomocy termopar wsadowych umiejscowionych w środkach segmentów. Ostatecznie do procesu wysokociśnieniowego hartowania w celu certyfikacji zastosowano ciśnienie gazu hartowniczego 9 bar.

Wyniki badań dotyczące trzeciego etapu pracy zostały zestawione w podrozdziale 8.3 (strony 113-148) „Badanie wpływu zastosowanego wariantu obróbki cieplnej schemat 2, 3 w warunkach przemysłowych na mikrostrukturę warstwy i rdzenia” W pierwszym etapie tego rozdziału Doktorant skupia się na mikrostrukturze warstwy nawęglonej oraz rdzenia. W tekście opisuje mikrostrukturę i wysuwa wnioski, że „Mikrostruktura warstwy i rdzenia jest zgodna z wymaganiami i jest typowa dla stali Pyrowear 53 po obróbce cieplno – chemicznej. Mikrostruktura warstwy nawęglonej stali Pyrowear 53 wytworzona w procesie nawęglania próżniowego cechuje się występowaniem wysokowęglowego martenzytu odpuszczonego z widocznymi strefami austenitu szczątkowego (wizualnie mniej niż 10%) oraz węglnikami, zarówno w obszarze średnicy podziałowej jak również w obszarze średnicy stopy uzębienia.

Niestety w pracy zabrakło fotografii mikrostruktury warstwy nawęglonej, którą Autor opisuje w tekście (podrozdział 8.3.1 str. 114). Nie ma również wyników badań dotyczących wielkości ziarna (fotografie, tabela), które zostały opisane przez doktoranta. Nie mniej jednak doktorant stwierdza, że zastosowanie schematów wybranych obróbki cieplnej nie powoduje rozrostu ziarna przy przeprowadzeniu obróbki cieplnej dla przyjętych parametrów technologicznych. Dodatkowo zmiana temperatury procesu hartowania również nie wpływa na różnice wielkości ziarna.

Podobnie jak w poprzednich dwóch etapach badań, została zmierzona twardość a wyniki przedstawiono w postaci wykresów o tabel. Dodatkowo w tym podrozdziale „Badania wytrzymałościowe” (8.3.2. strony 115-120) zestawiono w postaci tabelarycznej wyniki dotyczące granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, udarności oraz wysłużenia. W podsumowaniu tego podrozdziału Autor wysuwa wnioski, że „Uzyskane własności mechaniczne warstw nawęglanych procesu wg receptury C (rys. 32), wykazały uzyskanie powtarzalnych wartości głębokości warstwy efektywnej w obszarze średnicy podziałowej i średnicy stóp” oraz, że „Analiza uzyskanych wyników własności wytrzymałościowych w zależności od użytego schematu obróbki cieplnej wykazała brak różnic w uzyskanych wartościach parametrów. Dodatkowo uzyskane wartości są proporcjonalne do wartości uzyskanych przy tradycyjnym hartowaniu w ośrodku olejowym”. Na podstawie opracowanych wyników oraz po wzięciu pod uwagę aspektu technologicznego i ekonomicznego do ostatecznej certyfikacji procesu oraz opracowania technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego Doktorant wybrał jeden z dwóch badanych wariantów obróbki cieplnej (proces nawęglania próżniowego LPC w temperaturze 921°C, wygrzewanie w temperaturze austenitizacji 921°C 72 min do uzyskania w całej objętości austenitu w segmencie koła oraz hartowanie w atmosferze azotu o ciśnieniu bezwzględnym 0,9 MPa-abs (9 bar-abs), następnie wymrażanie wraz z dwukrotnym niskim odpuszczaniem dla stali Pyrowear 53).

Podrozdział 8.4 „Certyfikacja procesu koła produkcyjne schemat obróbki cieplnej 3” Doktorant opisuje przebieg przeprowadzonej obróbki cieplnej w warunkach przemysłowych. Do wykonania procesu certyfikującego, obok stosowanych segmentów kół zębatach użytych na wcześniejszych etapach badań, wykorzystano również koła produkcyjne oraz dodatkowo

koła przeznaczone do badań zmęczeniowych. Rozłożenie materiałów w piecu zostało zobrazowane na schemacie. Wsad do obróbki cieplnej stanowił masę wsadu produkcyjnego 18 kół. Waga jednego koła wynosiła 10,8 kg. Do certyfikacji użyto 9 kół produkcyjnych + 18 kół zmęczeniowych, do uzupełnienia wielkości wsadu użyto balastu (9 kół brakowych). Całkowita masa wsadu wynosiła 200 kg.

Podczas certyfikacji technologii HPGQ koła poddano kontroli wymiarowej w celu sprawdzenia deformacji hartowniczych, występujących podczas procesu HPGQ, ukierunkowanych na weryfikację deformacji występujących podczas tradycyjnego hartowania olejowego. Pomiarów dokonano w newralgicznych miejscach uzębienia celem kontroli naddatków szlifierskich w operacjach szlifierskich wykańczających uzębienie koła.

W kolejnym podrozdziale „Analiza mikrostruktury warstw i rdzenia” (podrozdział 8.4. strony 122-134) Doktorant skupia się na opisie wyników badań mikrostrukturalnych oraz pomiarze twardości. Niestety w tej części pracy nie zamieszczono zdjęć mikrostruktury, na które Autor powołuje się w tekście. Wyniki badań twardości, podobnie jak w poprzednich rozdziałach, opracowane są w formie wykresów rozkładu twardości w funkcji odległości od powierzchni. W opisie dotyczącym głębokości warstwy nawęglonej, po raz kolejny zaznaczono, że w obszarze średnicy podziałowej, głębokość warstwy nawęglonej jest większa w porównaniu do obszaru średnicy stóp zęba, co jest związane z geometrią uzębienia i powierzchnią czynną do procesu nawęglania.

Wyniki badań austenitu szczątkowego oraz pomiar naprężeń zostały zestawione w podrozdziale 8.4.2. Badanie austenitu szczątkowego wykonano na segmentach części rozłożonych zgodnie z wcześniej opisanym schematem. Badanie wykonano na 9 segmentach odwzorujących skrajne punkty strefy roboczej pieca. Pomiar naprężeń wykonano na segmentach części rozłożonych na przekątnej komory roboczej pieca w celu sprawdzenia równomierności rozkładu naprężeń w warstwie nawęglonej w komorze roboczej pieca (wsadu nawęglania). Podobnie jak przy pomiarze austenitu szczątkowego pomiaru dokonano na tym samym urządzeniu Proto X-ray diffractometr Combo. Badanie naprężeń wykonano w dwóch newralgicznych miejscach uzębienia, tj. Dna średnicy podziałowej oraz średnicy stóp. Na podstawie przeprowadzonych badań doktorant ustalił, że „Uzyskane wyniki z 9 próbek reprezentującą przestrzeń roboczą pieca przemysłowego wykazują równomierną mikrostrukturę warstwy i korelują z wynikami uzyskanymi w badaniu własności mechanicznych oraz badaniu naprężeń własnych w certyfikowanej technologii”. Wyniki badań naprężeń własnych wykazują stan naprężeń ściskających w warstwie nawęglonej co odpowiada danym literaturowym i potwierdza zgodność z normą PWA 79059. Doktorant zaznacza, że „na podstawie zgodnych wyników naprężeń własnych, uzyskanych podczas procesu w warunkach przemysłowych, koła do badań zmęczeniowych zostały przekazane do badań wykonywanych na Uniwersytecie w Ohio”

Ostatnim podrozdziałem „Badań własnych” jest „analiza wymiarowa procesu hartowania gazowego w zestawieniu do tradycyjnego hartowania olejowego kół produkcyjnych” (podrozdział 8.4.3 strony 139-14). Wyniki badań zostały zestawione w postaci tabel i wykresów w formie porównania zastosowanego hartowania gazowego z tradycyjnym hartowaniem olejowym. Doktorat obszernie opisuje różnice dla obu przypadków hartowania, a na podstawie przeprowadzonej analizy wymiarowej stwierdza, że „zastosowanie wysokociśnieniowego hartowania gazowego zmniejsza deformacje w stosunku do tradycyjnego procesu hartowania kół z materiału Pyrowear 53. W związku z tym

wielkość planowanego naddatku na obróbkę mechaniczną wykańczającą może być mniejsza, co wpływa na skrócenie procesu szlifowania oraz skrócenie dodatkowo procesu technologicznego”.

Prace kończą Wnioski, zebrane w 14 punktach, na podstawie których Doktorant stwierdza, że „Duża powtarzalność wyników w ocenie właściwości warstwy i rdzenia po procesie nawęglania próżniowego i wysokociśnieniowego hartowania gazowego przy ciśnieniu 0,9 MPa w porównaniu do warstw wytworzonych przy konwencjonalnej obróbce cieplnej z wykorzystaniem hartowanie olejowego oraz ich zgodność z wymaganiami norm odbiorczych kół zębatych przekładni FDGS, potwierdza prawidłowość opracowanych warunków procesu technologicznego ich wytwarzania”.

Uważam, że przedstawione założenia badań oraz analizy literaturowej są właściwe sformułowane i pozwalają na osiągnięcie założonego celu oraz udowodnienie tezy dysertacji. Jednak opis i analiza wyników cechują się pewnym chaosem, spowodowanym zarówno podziałem na poszczególne rozdziały, jak i użytym nazewnictwem w metodyce badań. Przykładem może być używane przez doktoranta nazewnictwo „receptura A, B, C” dotycząca sposobu nawęglania oraz „schemat 1a, 1b itd..” dotycząca rodzaju obróbki cieplnej. Podczas analizy wyników w tekście pojawia się wielokrotnie odwołanie do tych receptur i schematów co powoduje konieczność powracania do wcześniejszych rozdziałów pracy.

Osiągnięcia Doktoranta

Znaczna ilości zrealizowanych badań eksperymentalnych i materiałowych, niewątpliwie świadczy o dużej wiedzy Doktoranta w wielu obszarach badawczych, zaprezentowanych w dysertacji, jak i o umiejętności planowania eksperymentów oraz właściwej analizy i wnioskowania. Praca została zredagowana poprawną polszczyzną.

Opracowana technologia stwarza podstawę dla wdrożenia i zakwalifikowania procesu w warunkach produkcyjnych oraz zatwierdzenia zmian w normach lotniczych w procesie obróbki cieplnej stali Pyrowear 53.

Przedstawiona do oceny dysertacja stanowi oryginalne osiągnięcie Doktoranta. Badania zostały zrealizowane na wysokim poziomie, z zachowaniem zasad prawidłowej realizacji eksperymentu naukowego, udokumentowane dużą ilością wykresów i tablic. Dysertację można być wykorzystane przy dalszych pracach naukowo-badawczych oraz aplikacyjnych.

Uwagi krytyczne

Lektura rozprawy nasuwa pewne uwagi i wątpliwości, które mają charakter dyskusyjny.

1. Dlaczego do poszczególnych etapów pracy zostały wybrane trzy różne schematy nawęglania. Pierwszy to 14 cykli i 263 min, drugi etap to 16 cykli i 345 min i trzeci to 24 cykle, 524 min. Czy drugi etap pracy nie powinien być przeprowadzony według tej

samej receptury nawęglania co w pierwszym etapie i z różnymi wariantami obróbki cieplnej? A trzeci etap badań nie powinien opierać się na najlepszym wybranym wariantcie obróbki cieplnej w warunkach przemysłowych?

2. Pierwszy etap badań miał określić wpływ czasu astenizacji (72 i 150min) oraz prędkości chłodzenia na mikrostrukturę i własności wytrzymałościowe. Doktorant dokonał wyboru jednego z dwóch badanych czasów tj. 72 min, natomiast nie dokonał wyboru dotyczącego najbardziej korzystnej prędkości chłodzenia (1.5, 4, 9 bar).
3. Etap drugi pracy miał określić „ wpływ zastosowanego wariantu obróbki cieplnej na mikrostrukturę warstwy i rdzenia”. Doktorant wykonał analizę wyników na podstawie jednego schematu procesu nawęglania (16 cykli i 345 min), innego niż w pierwszym etapie badań, oraz sześciu wariantów obróbki cieplnej. W podsumowaniu rozdziału autor pisze: „Analiza uzyskanych wyników własności wytrzymałościowych w zależności od użytego schematu obróbki cieplnej wykazała brak różnic w uzyskanych wartościach parametrów wytrzymałościowych”. Nie ma jednak w podsumowaniu rozdziału wzmianki o wybranym „najlepszym” schemacie obróbki cieplnej. Czy to znaczy, że każdy badany rodzaj obróbki cieplnej byłby odpowiedni do certyfikacji procesu?
4. W tym samym rozdziale Doktorant przeprowadza dodatkowe badanie prędkości chłodzenia podczas hartowania w warunkach zbliżonych do warunków przemysłowych, w celu określenia ostatecznej wartości prędkości chłodzenia w gazie. Autor stwierdza „Ze względu na przebieg krzywej prędkości chłodzenia pod ciśnieniem 4 bar i certyfikację procesu w warunkach przemysłowych ostatecznie do procesu wysokociśnieniowego hartowania zastosowano ciśnienie gazu hartowniczego 9 bar” Wpływ prędkości chłodzenia nie był celem tego etapu badań. Miała ona zostać określona w pierwszym etapie (podrozdział 8.1).
5. Co spowodowało wybór dwóch schematów obróbki cieplnej w etapie trzecim badań? Są to te schematy obróbki cieplnej, które były badane w etapie drugim, ale według innego schematu nawęglania. Analizując tabele wyników (tabela 28 i 30), dostrzec można różnice w wartościach wyników granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, udarność oraz twardości. Jednak w obu przypadkach Doktorat pisze to samo „Analiza uzyskanych wyników własności wytrzymałościowych w zależności od użytego schematu obróbki cieplnej wykazała brak różnic w uzyskanych wartościach parametrów. Dodatkowo uzyskane wartości są proporcjonalne do wartości uzyskanych przy tradycyjnym hartowaniu w ośrodku olejowym. Uzyskane wartości parametrów wytrzymałościowych są zgodnie z normami odbiorczymi i materiałowymi”. Czy nie zasadne było wykonanie badań wstępnych dotyczących trzech wariantów nawęglania, i do kolejnych etapów wybranie najlepszego?
6. Rozdział 8.2.4 „Badanie profilu stężenia węgla C%”. Czy zasadne było badanie profilu stężenia węgla na próbkach płaskich? Wcześniej Autor powołuje się na fakt, że geometrię koła zębatego ma wpływ na głębokości warstwy nawęglonej i ta właśnie głębokość zależy od miejsca badania - jest różna w obszarze średnicy podziałowej zęba a średnicy stóp zęba.
7. Doktorant używa stwierdzenia „Określono rodzaj i morfologię składników fazowych mikrostruktury warstwy nawęglonej i rdzenia” . Aby określić skład fazowy należy

wykonać rentgenowską analizę fazową. Opis mikrostruktur na podstawie zdjęć uzyskanych za pomocą mikroskopu optycznego nie daje takiej możliwości.

8. Charakteryzowane przez Doktoranta mikrostruktury pozostawiają wiele do życzenia. Na większej ilości fotografii brak skali. Nie ma na nich również oznaczonej warstwy powstałej po procesie nawęglania. Autor niejednokrotnie opisuje mikrostrukturę „Mikrostruktura warstwy i rdzenia jest zgodna z wymaganiami i jest typowa dla stali Pyrowear 53 po obróbce cieplno - chemicznej. Mikrostruktura warstwy nawęglonej stali Pyrowear 53 wytworzona w procesie nawęglania próżniowego w czasie – receptura B, oraz po obróbce cieplnej wg opracowanego schematu (rys. 35, 36, 37) cechuje się występowaniem wysokowęglowego martenzytu odpuszczonego z widocznymi strefami austenitu szczątkowego (wizualnie mniej niż 10%) oraz węglnikami, zarówno w obszarze średnicy podziałowej jak również w obszarze średnicy podstawy uzębienia”. Rozumiem, że opis jest zgodny z normą, ale zamieszczone fotografie nie obrazują opisanych przez Autora składników strukturalnych.
9. Kolejne zastrzeżenia budzi stwierdzenie „Obecność wydzielen węglików w mikrostrukturze warstwy nawęglonej dla procesów nawęglania prowadzonych dla liczby cykli 16 i łącznym czasie procesu nawęglania 345min - receptura B, zależy od stężenia powierzchniowego węgla uzyskanego w procesie nawęglania próżniowego” Należy żałować, że badania nie były rozszerzone o skaningową mikroskopię elektronową wraz z badaniem składu chemicznego oraz rentgenowską analizę fazową, która faktycznie udowodniłaby występowanie w strukturze węglików.
10. Rozdział ósmy „Badania własne”, dotyczący wyników badań, zawiera również metodykę badawczą. Doktorant powinien skupić się w nim na wynikach badań wraz z ich analizą. Metodyka badawcza, została opisana w rozdziale piątym, zatytułowanym „Badania własne” oraz szóstym „Metodyka badań” i siódmym „Badania własne” (co jest powtórzeniem rozdziału 5). Rozdział 5, 6 oraz 7 powinien stanowić jeden rozdział, opisujący „Metodykę badawczą” podzieloną na podrozdziały.
11. Rozdziały 8.1.2 „Własności wytrzymałościowe”, 8.2.3 „Własności mechaniczne” oraz 8.2.6 „Badania własności wytrzymałościowych”, i 8.3.2 „Własności wytrzymałościowe”, skupiają się na badaniu twardości oraz opisie wyników badań wytrzymałościowych (granica plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie). Rozdziały te powinny zostać nazwane w taki sam sposób dla poszczególnych trzech etapów wykonywania pracy. Dodatkowo podrozdział 8.2.3 oraz 8.2.6 powinny stanowić jeden rozdział, tak jak to miało miejsce w poprzednich dwóch etapach.

Pomimo starannego zredagowania rozprawy wystąpiły w niej błędy edycyjne i niedopatrzenia:

- w spisie treści brakuje podrozdziału 8.1, który jest opisany w pracy,
- w rozdziale 6, podrozdział 6.2. schematy przebiegu nawęglania pozostawiają dużo do życzenia. Są nieczytelne, a czcionka jest zbyt mała,

- w niektórych przypadkach opisy rysunków lub osi na wykresach są w języku angielskim (np. rys.10, 11, 16, 17). Skoro praca została zredagowana w języku polskim to nie powinna zawierać takich elementów, mimo, że dotyczy to przypadków zaczerpniętych z anglojęzycznej literatury,
- w części I pracy, obejmującej analizę stanu zagadnienia, brak jest odnośników do pozycji literaturowych pod rysunkami 1, 2, 18, 8, 10, 11, 17, 26,
- w części II pracy, obejmującej wyniki badań własnych na znacznej części fotografii obrazujących mikrostruktury brakuje skali. Zdjęcia są różnej wielkości, co sugeruje, że nie są oryginalnymi zdjęciami np. rysunek 20, 47-64, 71-88. Dodatkowo występują powtórzenia tych samych fotografii, a w opisie są innymi badanymi próbkami (rys. 55 i 58),
- w części II pracy, obejmującej wyniki badań własnych, na znacznej części fotografii obrazujących mikrostruktury umieszczono skale, które różnią się pomiędzy poszczególnymi fotografiami. Rysunek 89-94,
- strona 41 - zamiast „w pracy podjęto się zagadnieniu” powinno być „w pracy podjęto zagadnienie”, lub „w pracy podjęto próbę opracowania”,
- strona 149 - zamiast 1). Powinno być 1) lub 1. Uwaga dotyczy wszystkich opisanych wniosków,
- tabela 22 - Wyniki badań – schemat obróbki cieplnej według (rys. 33, 34). Powinno być „Wyniki badań własności wytrzymałościowych”,
- spis Rysunków oraz tabel nie ma odnośników do numeru stron
- literatura - tytuły artykułów naukowych oraz książek powinny być ujęte w cudzysłowie
- niektóre schematy nie zostały wykonane samodzielnie przez Autora, natomiast wykonano ksero, skan i zamieszczono w pracy, np. (rys. 4).
- zróżnicowany opis dotyczący rysunków np. (rys. 5) i (rys.6). Po kropce należy używać spacji a uwaga dotyczy całej rozprawy doktorskiej.

Powyższe uwagi merytoryczne i edycyjne nie umniejszają dużej wartości dysertacji. Uważam rozprawę doktorską za bardzo wartościową i oryginalną.

Ocena końcowa

Ocena przedstawionej do zaopiniowania rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Wojtyczka upoważnia mnie do stwierdzenia, że Autor dokonał analizy stanu zagadnienia i na tej podstawie trafnie sformułował cele rozprawy. Poprzez badania materiałowe oraz wnikliwą analizę cele zostały przez Doktoranta osiągnięte.

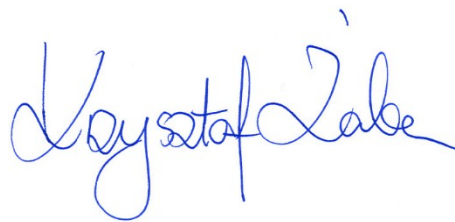
Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że mgr inż. Artur Wojtyczka wykazał się dobrą znajomością przedmiotu badań i poprawnie zredagował dysertację. Wykazał się przy tym bardzo dobrym przygotowaniem merytorycznym, umiejętnością wykorzystania metod, technik i narzędzi badawczych, zdolnością do samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych oraz ich analizy.

Recenzowana rozprawa doktorska może być przypisana do dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa.

Wniosek

Przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska mgr inż. Artura Wojtyczka pt. „Opracowanie technologii wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatach przekładni lotniczej silnika FDGS, wykonanych ze stali Pyrowear 53 i pracujących w warunkach długotrwałych i cyklicznie zmiennych obciążeń eksploatacyjnych” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.).

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie mgr inż. Artura Wojtyczka do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.



dr hab. inż. Krzysztof Żaba, prof. AGH