

## **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”**

### **Uwagi ogólne**

Nawęglanie stopów żelaza polega na nasyceniu warstw wierzchnich węglem w wysokich temperaturach w których istnieje jednorodny austenit w celu późniejszego ich zahartowania do wysokiej twardości (62-64 HRC). W ten sposób na powierzchni części maszyn zostaje wytworzona warstwa odporna na zużycie ścierne i zmęczenie stykowe przy zachowaniu wysokich właściwości mechanicznych i niezbędnej ciągliwości rdzenia. Zarówno w tradycyjnej jak i nowoczesnej obróbce cieplno-chemicznej oba te zabiegi jak również odpuszczanie po nawęglaniu stosuje się nierozłącznie określając całość terminem nawęglania i obróbki cieplnej po nawęglaniu. W przemyśle światowym funkcjonują setki tysięcy instalacji do tradycyjnego nawęglania gazowego. Zużywają one w skali gospodarki globalnej strategicznie istotną ilość energii elektrycznej oraz stanowią poważne zagrożenie dla środowiska w postaci emisji do atmosfery tlenków węgla, sadzy, dymów i par olejów hartowniczych. Również zabieg mycia detali z resztek oleju po hartowaniu stanowi poważne zagrożenie ekologiczne. Dlatego też nieustannie prowadzone są prace badawczo-rozwojowe, projektowe i wdrożeniowe nad nowoczesnymi, energooszczędnymi i przyjaznymi środowisku naturalnemu procesami nawęglania próżniowego, które w niedalekiej przyszłości winny zastąpić technologie tradycyjne. Warstwy nawęglone przeznaczone do eksploatacji w warunkach sprzyjających zmęczeniu stykowemu (np. na kołach zębatych, wałkach uzębionych, krzywkach, wałkach rozrzędu itp.) winny charakteryzować się powierzchniowym stężeniem węgla nie wyższym od eutektoidalnego tj. po zahartowaniu nie mogą zawierać wydzieleni cementytu wtórnego na granicach ziaren. Wysoka temperatura podczas austenitacji oraz

szybkie chłodzenie i zachodzące podczas niego przemiany strukturalne są przyczyną znacznych odkształceń hartowniczych. Odkształcenia te są poważnym mankamentem procesu nawęglania i obciążają wytwarzanie elementów nawęglanych istotnymi kosztami dodatkowymi. Dla ostatecznej korekty kształtu i wymiarów elementów nawęglanych nawet w przypadku wykorzystania najnowszych osiągnięć w dziedzinie optymalizacji technologii projektuje się naddatek technologiczny na szlifowanie ostateczne. Ważną funkcją tego zabiegu jest również usunięcie niewielkich obszarów przypowierzchniowej niedoskonałości struktury. W tradycyjnej obróbce cieplnej po nawęglaniu jako ośrodek oziębiający stosuje się powszechnie olej hartowniczy. Poważnymi niedogodnościami hartowania w oleju są dymy hartownicze szkodliwe dla środowiska naturalnego i obsługi, zagrożenie pożarowe oraz konieczność mycia i płukania części pomiędzy zabiegami hartowania i odpuszczania. Dlatego też w nowoczesnych instalacjach pieców do nawęglania próżniowego rozważa się i projektuje stosowanie chłodzenia nawęglanego wsadu w gazach pod podwyższonym ciśnieniem. Gazowe ośrodki oziębiające oparte głównie na azocie, wodorze i helu nie powodują zagrożenia skażeniem środowiska naturalnego gwarantują czystość obrabianych przedmiotów, które po zahartowaniu zachowują połysk metaliczny. W związku z tym uważam, że tematyka badawcza recenzowanej rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej aktualna i jest swoistego rodzaju wyzwaniem jaki Doktorant podjął opracowując technologię wysokociśnieniowego hartowania gazowego satelitarnych kół zębatach przekładni lotniczej. Wybór tematu i zakres pracy uważam za bardzo celowy.

Praca jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Ma ona klasyczny układ. Autor po wprowadzeniu dokonał przeglądu literaturowego omawiając proces nawęglania ze szczególnym uwzględnieniem jego fizycznych i chemicznych podstaw. Scharakteryzował niskociśnieniowe nawęglanie próżniowe oraz obróbkę cieplną po procesie nawęglania. Przedstawił zjawisko transportu energii podczas procesu hartowania, efektywność procesu hartowania oraz skoncentrował się na omówieniu wysokociśnieniowego hartowania gazowego, którym zajmował się w swoich badaniach. Nie pominął innych zabiegów takich jak obróbka podzerowa i odpuszczanie. Na zakończenie przedstawił wymagania technologiczne stawiane warstwie nawęglanej mając przypuszczenie iż zaproponowane przez niego wysokociśnieniowe hartowanie gazowe po obróbce nawęglania sprostą tym wymaganiom. Do tej części pracy nie mam żadnych uwag. Autor opisał powyższe zagadnienia korzystając z bogatej literatury przedmiotu. Następnie Autor przedstawił tezę, cel i zakres pracy, które uważam za właściwe. Kolejny rozdział dotyczy metodyki badań, zarówno procesów nawęglania próżniowego, obróbki cieplnej po procesie LPC, badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych.

Następny rozdział dotyczy wyników otrzymanych podczas realizacji pracy doktorskiej. Podzielono go na trzy zasadnicze części. Część I Badanie wpływu czasu austenizacji i prędkości chłodzenia na własności wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę warstwy i rdzenia stali Pyrowear 53 (opis ten zniknął ze spisu treści). Część II Badanie wpływu zastosowanego wariantu obróbki cieplnej na mikrostrukturę warstwy i rdzenia (należało dodać w tytule podrozdziału „i właściwości wytrzymałościowe”) Część III Badanie wpływu zastosowanego wariantu obróbki cieplnej schemat 2 i 3 w warunkach przemysłowych na mikrostrukturę warstwy i rdzenia (również w tytule brakuje właściwości wytrzymałościowych) i ostatni rozdział zatytułowany Certyfikacja procesu koła produkcyjne schemat obróbki cieplnej 3. Całość pracy kończą wnioski i spis literatury.

### **Uwagi szczegółowe**

Po analizie rysunku 18 strona 36 na którym przedstawiono schemat blokowy procesu technologicznego wytwarzania kół do przekładni planetarnej muszę stwierdzić, że dotychczasowa technologia jest bardzo skomplikowana, stosująca trzykrotnie procesy miedziowania. Co więcej trzeba także zastosować procesy usuwania powłoki miedziowej. Domyślam się, że Doktorant nie mógł opisać technologii usuwania powłoki miedziowej co nie jest operacją tuzinkową. Dlatego też należy jeszcze raz podkreślić celowość podjęcia tematyki połączenia procesu nawęglania próżniowego (na schemacie wciąż widnieje kafelek przedstawiający nawęglanie gazowe) z procesem hartowania w gazie obojętnym nie powodującym procesów odwęglania. W związku z tym zastosowanie schematu obróbki przedstawionego na rys. 35 rozdzielającego proces nawęglania od hartowania wydaje się być niecelowe, czym Autor kierował się proponując ten schemat obróbki.

W pracy nie znalazłem schematu stosowanej obecnie obróbki nawęglania z obróbką cieplną zawierającą hartowanie w oleju, którą to technologię Doktorant próbuje zastąpić

Czy w stosowanej obecnie obróbce stosuje się wygrzewanie austenizacyjne po procesie nawęglania. Interesuje mnie cel stosowania wygrzewania po procesie nawęglania które to Doktorant zaproponował w swoich schematach. A gdyby zastosować hartowanie bezpośrednio po nawęglaniu.

Kolejne pytanie które nasunęło się recenzentowi to dlaczego receptury nawęglania A i B stosowano w piecu na Politechnice Rzeszowskiej a receptura C była realizowana w innym piecu w firmie Pratt Whitney Rzeszów.

Czym kierowano się obniżając temperaturę wygrzewania austenizacyjnego z temperatury 921°C do 913°C.

Dostrzegłem także dużą nieścisłość na stronach 58 i 59. W opisie schematu 1B podano, że hartowanie po austenizacji realizowano w oleju hartowniczym a w tabeli podano, że w atmosferze azotu.

W którym piecu realizowano proces nawęglania próżniowego opisany na stronie 65. Oba przedstawione piece są firmy ALD.

Jak określano wielkość ziarna austenitu. Czy ze zdjęć mikrostruktury przedstawionych w pracy. Mam co do tego poważne wątpliwości.

Z rysunku 65 nie wynika że głębokość warstwy nawęglonej wynosi 0,9 mm dla obszaru średnicy podziałowej zęba a 0,73 mm dla obszaru średnicy stóp zęba, czy jest zła skala na osi x

Moje wątpliwości budzi fakt podawania z dokładnością o 0.01 mm głębokości warstwy nawęglonej z rozkładu mikrotwardości (nie twardości jak pisano w pracy bo stosowane obciążenie było niższe niż 1 kg) bowiem pomiary mikrotwardości realizowano co 100 mikrometrów czyli co 0,1mm (tak przynajmniej wynika z zaprezentowanych w pracy rysunków) W całej pracy występuje brak rachunku błędów. Jest on tylko przedstawiony w tabeli 35 omawiającej wyniki badań ilości austenitu szczątkowego.

Do wyników przedstawionych w tabeli 22 na stronie 88 powinno się dodać rysunek z krzywych rozciągania.

W rozdziale 8.2.4 nie przedstawiono wyników profilu stężenia węgla dla receptury A i receptury C.

W całej pracy doktorskiej nie znalazłem aspektu naukowego pracy. Doktorant nie pokusił się o wyjaśnienie np. różnic w profilu stężenia węgla przy zastosowaniu jednej receptury B oraz różnych schematów obróbki cieplnej. Taka próba wyjaśnienia bardzo zwiększyłaby poziom naukowy doktoratu. Analizując literaturę w pracy doktorskiej nie znalazłem żadnego artykułu współautorstwa doktoranta.

W tym miejscu pragnę napisać, że literatura została przedstawiona w sposób wielce nieuporządkowany. W wielu pozycjach literaturowych podano jedynie autora i tytuł a ta sama pozycja literaturowa jest jako 108 i 125.

Czym doktorant kierował się wybierając do badań certyfikacyjnych recepturę C (najdłuższy czas nawęglania) to, że wybrał schemat obróbki cieplnej przedstawiony na rys 37 wydaje się oczywiste chociaż nie podjął się próby wyjaśnienia jak zmiana ciśnienia azotu wpływa na mikrostrukturę i właściwości obrabianego detalu.

Dlaczego nie analizowano koła nr 5 umieszczonego na II poziomie pieca

Bardzo wartościowe w pracy jest wykonanie badań naprężeń własnych występujących w strukturze, ale opis osi na rys. 132 i 133 pozostawia wiele do życzenia.

Podobnie bardzo pozytywnie oceniam rozdział omawiający analizę wymiarową kół zębatych. Doktorant stwierdził, że zastosowanie wysokociśnieniowego hartowania gazowego zmniejsza deformacje w stosunku do tradycyjnego procesu hartowania kół.

Pod koniec pracy brakuje mi tabeli, w której doktorant porównałby wyniki dla tradycyjnej obróbki stosowanej obecnie z hartowaniem w oleju z wynikami otrzymanymi dla zaproponowanej przez siebie technologii. Umożliwiłoby to odpowiedź na pytanie, czy zaproponowana technologia powoduje tylko obniżkę kosztów, czy też otrzymuje się w niej lepsze parametry wytrzymałościowe. Rozumiem, że należy jeszcze przeprowadzić badania na wyłamywanie zęba i porównać te wyniki. Czy te badania będą prowadzone w Uniwersytecie w Ohio do którego przekazano koła obrobione w procesie certyfikacji.

### **Opinia końcowa**

W podsumowaniu mojej oceny stwierdzam, że mgr inż. Artur Wojtyczko otrzymał w swojej pracy oryginalne wyniki badań, dowiódł umiejętności przeprowadzenia i stosowania różnych technik badawczych, wykazał się umiejętnością planowania eksperymentu oraz analizą uzyskanych wyników. Uważam, że recenzowana rozprawa zawiera szereg wartościowych i oryginalnych rezultatów, które mają bardzo duży potencjał aplikacyjny

Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych. Wniosuję, zatem o dopuszczenie mgr inż. Artura Wojtyczko do publicznej obrony.

