



Katowice, 7 marca 2022

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Rzepeckiej - Bodzak

pt. „Wpływ nagniatania strumieniowego na właściwości warstwy wierzchniej elementów z wybranych stali stopowych”

Uwagi formalne

Opinię niniejszą wykonałam na podstawie przesłanego do mnie pisma Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej Pana dr hab. inż. Jarosława BIENIASIA z dnia 14.01.2022 roku.

Ocena istotności problemu naukowego rozprawy

Zasadniczym problemem podjętym w rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej - Bodzak jest określenie wpływu procesu nagniatania strumieniowego na stan warstwy wierzchniej, właściwości mechaniczne oraz odporność na zużycie ścierne i kawitacyjne dwóch gatunków stali tj. austenitycznej kwasoodpornej w gatunku 304 oraz martenzytycznej odpornej na korozję w gatunku 413.

Krokami zdefiniowanymi przez Autorkę jakie mają wpływ na zrealizowanie i właściwe poprowadzenie toku rozprawy są: przygotowanie materiału badawczego, przeprowadzenie procesu nagniatania strumieniowego stosując zmienne parametry ciśnienia, analiza stanu warstwy wierzchniej z użyciem wielu technik między innymi XRD, SEM w tym EDS, badania profilometryczne, badania mikrotwardości, analiza naprężeń własnych, badania wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie obrotowe, badania odporności na zużycie ścierne oraz na erozję kawitacyjną aż w efekcie ustalenie związków pomiędzy takimi czynnikami jak współczynnik zużycia, tarcia, skumulowany ubytek masy, prędkość erozji i liczba cykli do zerwania a mikrotwardość, chropowatość i umocnienie stali.

Zagadnienie opracowywania i rozwijania a także wdrażania do praktyki przemysłowej procesów nagniatania w celu poprawy wytrzymałości zmęczeniowej, zmniejszenia skutków zużycia tribologicznego i odporności korozyjnej elementów konstrukcyjnych stanowi nadal przedmiot zainteresowań ośrodków naukowych i przemysłu. Pomimo istnienia ogromnej liczby rozwiązań w tym zakresie nadal istnieje luka w obszarze wpływu zmiany wybranych parametrów procesu nagniatania na właściwości i zachowanie się materiału w tym procesie. Głównym celem jego

stosowania jest poprawa właściwości warstwy wierzchniej w materiałach mogących mieć aplikację w lotnictwie na elementy pracujące w warunkach obciążeń termomechanicznych i zmęczenia cieplnego. W takich zastosowaniach często wymienia się możliwość umocnienia warstwy wierzchniej w procesie nagniatania dla znanych i klasycznych materiałów jakimi są stale stopowe w tym między innymi żarowytrzymałe celem poprawy ich właściwości do zastosowań w gorących i obciążonych częściach turbin silników lotniczych. W tym też obszarze można zwrócić uwagę na fakt, że większość prac koncentruje się na skutkach procesu nagniatania jakie wywiera on w stalach austenitycznych lub też w stalach ferrytycznych odpornych na korozję. Nieliczne opracowania dotyczą w tym zakresie właściwości stali martenzytycznych o znacznie wyższych właściwościach mechanicznych. W analizie literaturowej zagadnienia technologii Autorka odnajduje więc lukę, dotyczącą braku wiedzy na temat oddziaływania zmiennych parametrów procesu nagniatania stali stopowych z grupy odpornych na korozję o strukturze austenitycznej i martenzytycznej na ich właściwości, stan warstwy wierzchniej i odporność na korozję i erozję kawitacyjną.

W tym kontekście wybór tematyki pracy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej - Bodzak jest w pełni uzasadniony. Ma to odzwierciedlenie zarówno w przyjętej strategii zaprojektowania i realizacji poszczególnych etapów pracy, które Autorka wnikliwie przemyślała, na podstawie przeanalizowanej literatury i doświadczeń zespołu kierowanego przez promotora rozprawy Pana profesora Mariusza Walczaka, jak również w prowadzeniu kolejnych kroków badawczych w rozprawie, w tym realizacji procesu nagniatania, badań właściwości mechanicznych warstwy wierzchniej, badań strukturalnych badań zmęczeniowych, oceny odporności na zużycie ściernie i erozję kawitacyjną. Przedłożona do recenzji praca doktorska wpisuje się ze swoją tematyką w interesujące i bardzo aktualne obszary badań aplikacyjnych nauk technicznych w obszarze inżynierii mechanicznej.

Przedstawione do oceny szerokie i kompleksowe opracowanie zostało przygotowane w formie oprawionego wydruku książkowego o objętości 153 stron. Atutem pracy jest bardzo obszerna i estetyczna forma przedstawienia rysunków i mikrostruktur stanowiących dokumentację, zarówno wybranych z literatury wyników badań, jak i badań własnych Autorki. Struktura rozprawy nie odbiega od przyjętych standardów dla tego rodzaju opracowań. Doktorantka podzieliła pracę na dwie zasadnicze części. Pierwsza z nich zajmuje 58 stron i jest to opracowanie literaturowe, które jest podzielone jest na 2 rozdziały. Wprowadzają one czytelnika w tematykę zagadnienia i zarysowują problem badawczy. Pozytywnym aspektem tej części jest jej podsumowanie stanowiące wprost wskazanie w jakie luki wiedzy wpisuje się praca i nawiązanie do chęci podjęcia problematyki badawczej proponowanej w pracy. Literatura pracy jest właściwie dobrana i aktualna. W spisie literatury, Doktorantka podaje 116 pozycji krajowych i zagranicznych, do których odwołuje się w swojej rozprawie. W tej grupie znalazły się jedynie 3 prace współautorstwa Doktorantki, które publikowała w materiałach konferencyjnych w czasie swej pracy naukowej związanej z tematem pracy. Druga część, którą należy zaliczyć do części eksperymentalnej, przedstawiona została na 84 stronach, co stanowi niemal 70 procent objętości pracy. Tę część pracy otwiera rozdział „Cel, teza i zakres rozprawy doktorskiej”, a następnie rozdziały „5 – nagniatanie strumieniowe badanych stali stopowych”, „6 - Metodyka badań”, „7 – Wyniki badań i ich analiza” oraz „8 – Wnioski końcowe” opisujące ideę podjętego zagadnienia, materiał do badań, stanowiska badawcze, w tym urządzenie do nagniatania, opis metodyki i wyniki poszczególnych badań. W rozdziale ostatnim „Wnioski końcowe”, w którym zawarto syntetyczne odniesienie się Autorki do uzyskanych w toku rozprawy wyników badań znajdziemy krytyczną ocenę uzyskanych wyników. Na str. 7 rozprawy Doktorantka

zamieściła wykaz symboli, oraz skrótów co również podnosi jakość opracowania i ułatwia interpretację i analizę treści, równań i rysunków.

Merytoryczna ocena pracy

Szczegółowe studium literaturowe Doktorantka zaprezentowała w rozdziale 2 i 3 rozprawy. Autorka przedstawiła charakterystykę procesów nagniatania, ich klasyfikację, efekty w postaci wpływu procesu na budowę warstwy wierzchniej oraz wybrane zastosowania procesu w takich branżach jak automotive, lotnictwo czy przemysł zbrojeniowy. Znajdziemy tu informacje na temat możliwości wpływania na mikrostrukturę a tym samym właściwości materiałów, w wyniku stosowania technologii nagniatania. Dalej Autorka rozprawy dokonała szczegółowej charakterystyki wpływu procesu nagniatania na właściwości warstwy wierzchniej w tym na twardość, zmiany mikrostrukturalne, stan naprężeń, strukturę geometryczną powierzchni, właściwości wytrzymałościowe a także odporność na zużycie i kawitację. Należy podkreślić, że ta deskrypcja jest dobrze przygotowana i została przeprowadzona w sposób logiczny, a omówiona problematyka w części literaturowej dobrze koresponduje z tematem pracy oraz problematyką zaprezentowaną w części praktycznej.

W części eksperymentalnej pracy, na podstawie analizy przeglądu literatury Doktorantka stawia tezę i cele rozprawy. Teza brzmi: **Istnieje związek pomiędzy parametrami obróbki nagniatania strumieniowego (shot peeningu) a strukturą warstwy wierzchniej, właściwościami mechanicznymi i przeciwzużyciowymi stali AISI 304 i AISI 413.**

Jednocześnie Autorka definiuje dwa cele szczegółowe pracy tj. cel naukowy rozprawy doktorskiej: określenie wpływu nagniatania strumieniowego stali o strukturze austenitycznej (AISI 304) i martenzytycznej (AISI 413) na stan warstwy wierzchniej, właściwości mechaniczne oraz odporność na zużycie ścierne i kawitacyjne (str.62); oraz cel użytkowy rozprawy doktorskiej tj: wytypowanie parametrów technologicznych nagniatania strumieniowego prowadzących do wzrostu właściwości eksploatacyjnych stali stopowych stosowanych do produkcji elementów części maszyn, min. kół zębatach, wałów korbowych, sprężyn dociskowych, hamulców hydraulicznych i łopatek turbin.

Na uwagę zasługuje fakt, że cel użytkowy jest związany z zastosowaniem wyników pracy w firmie Sulzer Turbo Services.

W tym miejscu pozwolę sobie stwierdzić, że teza jest sformułowana jasno i dość klarownie, choć zabrakło w niej precyzyjnego wskazania, które to parametry procesu nagniatania (dalej w pracy uzyskujemy informację, że jest nim jeden parametr tj. ciśnienie) mają wpływ na wynikową w postaci struktury warstwy wierzchniej, właściwości mechanicznych i odporności na zużycie oraz jaka mikrostruktura jest pożądana i korzystna dla osiągnięcia założonego celu i czy własności te są z góry narzucone przez wymagania wystandaryzowane dla konkretnych elementów konstrukcyjnych. W opinii recenzentki doprecyzowanie wpłynęłoby na większą ścisłość tezy pracy z uwypukleniem zmiennego parametru, na który należy zwrócić uwagę w planowaniu procesu wytwarzania wyrobu końcowego szczególnie z przeznaczeniem dla przemysłu lotniczego. Doktorantka właściwie zdefiniowała cele szczegółowe rozprawy, które prowadzą czytelnika w tok rozumowania Autorki.

W tym miejscu muszę podkreślić, iż mimo jej ogólności, słuszność postawionej tezy i dobrze ujęte cele rozprawy Autorka wykazała w kolejnych rozdziałach badawczych swojej pracy. Jednocześnie do potwierdzenia tezy, zrealizowała szeroki, adekwatny i właściwie dobrany program

badania a całość opracowania posiada bez wątpienia ma znamiona oryginalności, i rzetelnej sztuki prowadzenia pracy na poziomie rozprawy doktorskiej.

Rozdziały od 5 do 8 są najważniejszymi rozdziałami w pracy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej - Bodzak. Przeprowadzone przez nią badania wymienione w rozdziale 4.2 „Zakres rozprawy” mają charakter technologiczno - eksperymentalny i są dobrze opisane. Na podkreślenie zasługuje przede wszystkim połączenie zarówno dobrze zaplanowanych i właściwie zinterpretowanych badań strukturalnych i mikrostruktury jak i badań mechanicznych oraz badań odporności na zużycie i kawitację. Ponadto dobrze zaprojektowane eksperymenty mające na celu zróżnicowanie ciśnienia nagniatania wprowadzają w tok zrozumienia tezy rozprawy.

Jak wcześniej sygnalizowano dla dowiedzenia tezy i realizacji postawionych celów rozprawy, Doktorantka przede wszystkim wykonała szeroki, zawierający triangulację wielu metod badawczych program badań doświadczalnych, który obejmował:

- 1) Przygotowanie próbek stali stopowych do procesu nagniatania strumieniowego.
- 2) Wykonanie eksperymentów nagniatania z zastosowaniem zmiennego ciśnienia.
- 3) Przygotowanie próbek do badań warstwy wierzchniej.
- 4) Analizę mikrostruktury i składu fazowego warstwy technikami XRD, SEM, EDS.
- 5) Badania profilometryczne i ocenę naprężeń własnych.
- 6) Analizę właściwości mechanicznych w tym wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie obrotowe.
- 7) Przeprowadzenie badań odporności na zużycie ściernie i erozję kawitacyjną.
- 8) Analizę wyników i ustalenie związków pomiędzy parametrami nagniatania a współczynnikiem zużycia, współczynnikiem tarcia, skumulowanym ubytkiem masy, prędkością erozji, liczbą cykli do zerwania i mikrotwardością, chropowatością i umocnieniem stali.

Część doświadczalna i badawcza pracy ma dużą wartość użytkową ale i stanowić może przyczynek do użycia poszczególnych wyników badań, wzbogaconych o bardziej zaawansowane techniki badawcze, szczególnie w obszarze zmian mikrostruktury i mechanizmów towarzyszących odkształceniu (umocnieniu w wyniku nagniatania), w kolejnych dobrych pracach naukowych na światowym poziomie. Całości pracy dopełniają starannie opracowane tablice, wykresy i zależności.

Oceniając tę część rozprawy stwierdzam, że jest ona poprowadzona logicznie i poszczególne rozdziały w sposób rzeczowy następują po sobie tworząc spójny układ, który ma na celu potwierdzenie przyjętej tezy.

Konkludując, Doktorantka zebrała ciekawy i wart uwagi materiał z badań. Część eksperymentalna recenzowanej rozprawy została przygotowana pieczołowicie. Doktorantka dołożyła wszelkich starań aby zadbać o racjonalny i przemyślany tok realizacji pracy, w tym także odpowiednie przygotowanie i prowadzenie eksperymentów. Opisy eksperymentów są kompletne. Załączone rysunki, tabele oraz schematy są przejrzyste i dobrze uzupełniają tekst rozprawy. Muszę zaznaczyć, iż tekst rozprawy został przygotowany z poszanowaniem reguł języka polskiego. Strona redaktorska pracy nie budzi zastrzeżeń, a błędy redakcyjne są nieliczne.

Niedostatek pracy budzi brak rozdziału „Podsumowanie wyników rozprawy”, w którym to recenzentka spodziewała się uzyskać niejako syntetyczne opracowanie zrealizowania ostatniego z zaplanowanych punktów z zakresu pracy gdzie zawarte będą związki: pomiędzy parametrami nagniatania a współczynnikiem zużycia, współczynnikiem tarcia, skumulowanym ubytkiem masy, prędkością erozji, liczbą cykli do zerwania i mikrotwardością, chropowatością i umocnieniem stali.

W tym miejscu czuję się zobligowana do poruszenia kilku kwestii dyskusyjnych, do których Pani mgr inż. Anna Rzepecka - Bodzak będzie miała możliwość ustosunkować się podczas publicznej obrony:

1. W pracy prowadzono pomiary mikrotwardości w celu określenia stopnia umocnienia warstwy wierzchniej. Przeliczono stopień umocnienia dla stali austenitycznej i martenzytycznej zgodnie z zależnością na stronie 72. Jak można zauważyć dla próbek ze stali austenitycznej mamy do czynienia ze zwiększeniem stopnia umocnienia w zależności od wariantów nagniatania o 57%, 60% i 123% w przypadku wariantu A4. Dla stali martenzytycznej stopień umocnienia rośnie od 2% przez 22% aż do 53 dla wariantu A4. Podobne tendencje uzyskano dla stopnia umocnienia liczonego na przekroju badanych próbek. Proszę Doktorantkę o wskazanie mechanizmów umocnienia jakie zachodzą w warstwie wierzchniej i są efektem procesu nagniatania, a jednocześnie, które są charakterystyczne dla stali austenitycznych oraz stali martenzytycznych. Ponadto z czego wynikają i jak przekładają się na stopień umocnienia a także jaki mogą mieć wpływ na inne właściwości z grupy właściwości mechanicznych.
2. W opisie wyników analizy XRD – str. 91 – Autorka podaje, że zwiększenie ciśnienia nagniatania prowadzi do zaniknięcia fazy austenitycznej i ujawnienia w strukturze martenzytu. Jednocześnie Autorka wyjaśnia przyczynę tego zjawiska jako indukowana odkształceniem plastycznym przemiana austenitu w martenzyt. Proszę o dokładniejsze scharakteryzowanie tego zjawiska wraz z powołaniem się na znaną w tym obszarze literaturę a także na odniesienie się do zmian składu fazowego na skutek umocnienia w kontekście pytania nr 1.
3. W odniesieniu do wpływu ciśnienia nagniatania na mikrostrukturę warstwy wierzchniej nasuwa się pytanie: jaki wpływ na jakość powierzchni obu stali będzie wywierała obecność ceramicznych pozostałości śrutu oraz jego skupisk? Na ile obecność zidentyfikowanych w analizach EDS tlenków Zr świadczy o prawidłowości procesu nagniatania strumieniowego. Ponadto jeśli w miarę wzrostu ciśnienia nagniatania rośnie stopień degradacji warstwy pojawiają się głębokie kratery i pęknięcia a jednocześnie ilość cząstek ceramicznych na powierzchni obu stali wzrasta to czy taki proces jest technologicznie dopuszczalny i prawidłowy?
4. W nawiązaniu do pytania 2 i 3 i w odniesieniu do badań zmęczeniowych również nasuwa się uwaga na temat wpływu stanu warstwy wierzchniej i jej parametrów wytrzymałościowych a także jej spójności na wytrzymałość zmęczeniową w testach zginania obrotowego a szczególnie na możliwości zarodkowania pęknięć zmęczeniowych w obszarze karbu geometrycznego.
5. Na stronie 121 Autorka prezentuje zależność współczynnika tarcia od stopnia umocnienia na powierzchni. Pragnę zapytać jak ma się to porównanie do samej wartości mikrotwardości badanych stali gdzie stal martenzytyczna posiada mikrotwardość powierzchni o minimum 100 HV_{0,1} wyższą w porównaniu do stali austenitycznej. Ponadto w tym miejscu proszę o uzupełnienie wyjaśnienia dlaczego wybrane pomiary zostały przeprowadzone przy obciążeniu 0,1 tj. 0,9807 N a inne 0,2 tj. 1,961 N i dlaczego twardość HV_{0,2} to jeszcze według Autorki mikrotwardość a prawidłowo już powinna być to twardość?

Nasuwa się również pewna sugestia do wyników badań mikrostrukturalnych. Ciekawym byłoby ich uzupełnienie o badania wpływu nagniatania na teksturę a także szczegółowe badania mikrostrukturalne wyjaśniające mechanizmy umocnienia jakie Autorka wskazuje nie powołując się na dostępną w tym zakresie literaturę. Ponadto można z powodzeniem uzupełnić wyniki o zagadnienie związane z modelowaniem numerycznym procesu nagniatania z uwzględnieniem rozkładu naprężeń. Niemniej jednak praca jest dobrym opracowaniem naukowym a wyżej

wymienione kwestie mogą być z powodzeniem rozwijane w dalszych pracach Autorki i zespołu pod kierunkiem Promotora rozprawy.

Powyższe pytania oraz uwagi, w tym dyskusyjne, nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej - Bodzak.

Stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi cenną bazę informacji dla dalszych, celowych badań aplikacyjnych. Ponadto przedstawione i opisane w pracy wyniki badań nakreślają wiele kierunków dalszych prac badawczych z tego obszaru w tym szczególnie prac o charakterze naukowym.

Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej należą:

- 1. Ustalenie związków pomiędzy parametrami procesu nagniatania strumieniowego a wynikami badań uzyskanymi w trakcie realizacji dość szerokiego zakresu badawczego przyjętego w rozprawie. Ściślej mówiąc dotyczy to związków pomiędzy parametrami nagniatania a współczynnikiem zużycia, współczynnikiem tarcia, skumulowanym ubytkiem masy, prędkością erozji, liczbą cykli do zerwania i mikrotwardością, chropowatością i stopniem umocnienia stali.**
- 2. Wskazanie korzystnego wariantu zastosowanego procesu obróbki powierzchniowej, który będzie, z punktu widzenia eksploatacji badanych materiałów, stanowił profilowany sposób modyfikacji właściwości i struktury warstwy badanych stali stopowych.**

Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Doktorantka rozwiązała problemy o znaczeniu poznawczym, technologicznym i eksploatacyjnym z zakresu inżynierii warstwy wierzchniej i technologii obróbki powierzchniowej. Wykazała się niezbędną wiedzą z zakresu przedmiotu pracy, stosowanych technik i metod badawczych oraz przede wszystkim umiejętności połączenia wielu wyników badań i logicznego wnioskowania. O dobrym poziomie naukowym opiniowanej pracy świadczy również skoncentrowanie na właściwym ujęciu problemu, poprawnie poprowadzonej dyskusji wyników i wytyczeniu ciekawej ścieżki badawczo-eksperymentalnej będącej uzupełnieniem dotychczasowych prac badawczych z zakresu możliwości wpływania na strukturę, a tym samym na właściwości końcowe stali stopowych poddanych obróbce powierzchniowej przeznaczonych na odpowiedzialne elementy konstrukcyjne.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska

Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej - Bodzak

pt.: „**Wpływ nagniatania strumieniowego na właściwości warstwy wierzchniej elementów z wybranych stali stopowych**”

spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595). W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy mgr inż. Anny Rzepeckiej - Bodzak i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

Magdalena Janion-Bodzak