



Dr hab. inż. Cezary Rapiejko, prof. uczelni

cezary.rapiejko@p.lodz.pl

Politechnika Łódzka

Wydział Mechaniczny

Katedra Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji

RECENZJA
rozprawy doktorskiej

mgr inż. Joanny Jasińskiej z tytułowanej

„Ocena właściwości funkcjonalnych bezmiedziowego staliwa duplex po procesie nagniatania statycznego naporowego tocznego”

Promotor dr hab. inż. Grzegorz Stradomski, prof. PCz

wykonana na zlecenie Kierownika Dyscypliny Naukowej

Inżynieria Materiałowa Politechniki Częstochowskiej

dra hab. inż. Rafała Prusaka, prof. PCz

ŁÓDŹ, maj 2022

Dr hab. inż. Cezary Rapiejko, prof. uczelni
Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny
Katedra Technologii Materiałowych
i Systemów Produkcji

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Joanny Jasińskiej** zatytułowanej
*„Ocena właściwości funkcjonalnych bezmiedziowego staliwa duplex po procesie
nagniatania statycznego naporowego tocznego”*

Promotor dr hab. inż. Grzegorz Stradomski, prof. PCz

wykonana na zlecenie Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa
Politechniki Częstochowskiej dra hab. inż. Rafała Prusaka, prof. PCz

1. Charakterystyka ogólna pracy

Pierwsze wzmianki o stali duplex pochodzą z lat dwudziestych XX wieku. Jednak produkcja pierwszych stopów rozpoczęła się dopiero w latach trzydziestych minionego wieku. Pierwsze stale duplex zawierały stosunkowo dużą ilość węgla, natomiast w latach 60 zaczęto wytwarzanie stali niskowęglowych o wysokiej zawartości chromu i niklu otrzymując stopy o mikrostrukturze ferrytyczno-austenitycznej, co zapoczątkowało rozwój tych gatunków. Pomimo, że stale duplex stanowią niewielki procent światowego rynku, to w odniesieniu do tradycyjnych stali austenitycznych i ferrytycznych posiadają szereg zalet, do których należą: znacznie wyższe właściwości mechaniczne, dobra ciągliwość czy też wyższa odporność na korozję. Stale duplex są stosowane m.in.: w środowiskach, gdzie występuje duża ilość chloru, przy produkcji biopaliw, do produkcji ropociągów i gazociągów. Ich coraz większe możliwości aplikacyjne przyczyniają się do rozwoju nowych gatunków.

Badania prowadzone w kierunku poprawy właściwości użytkowych stali duplex są bardzo istotnymi, stąd recenzowana praca wpisuje się w tematykę współczesnych badań, a dotyczy zagadnień związanych z określeniem możliwości poprawy właściwości warstwy wierzchniej staliw duplex poprzez zastosowanie procesu nagniatania statycznego naporowego tocznego.

Autorka w swojej pracy przeprowadziła badania związane z możliwością zastosowania obróbki nagniataniem bezmiedziowego staliwa duplex wpływającej na poprawę właściwości warstwy wierzchniej wybranych dwóch gatunków GX2CrNiMoN22-5-3 oraz GX2CrNiMoN25-6-3.

Przedstawioną problematykę recenzowanej dysertacji należy uznać jako trafną zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i przede wszystkim użytecznego ze względu na możliwości zastosowania wyników badań Autorki do praktyki przemysłowej w odlewni PGO S.A. Pioma w Piotrkowie Trybunalskim.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Jasińskiej zatytułowana „Ocena właściwości funkcjonalnych bezmiedziowego staliwa duplex po procesie nagniatania statycznego naporowego tocznego” liczy 144 stron, które uzupełnia streszczenie w języku polskim i angielskim oraz bibliografia zawierająca 144 pozycje.

Uważam, że przeprowadzona analiza aktualnego stanu wiedzy i dobór literatury przez Doktorantkę wnoszą o Jej dobrym merytorycznym przygotowaniu do podjęcia problematyki związanej z realizowaną tematyką pracy. Pozycje literaturowe są aktualne, większość publikowana jest po 2000 r. Język rozprawy jest poprawny, konstrukcja pracy jest logiczna, prawidłowo określono hipotezę i cele pracy.

Poziom edycyjny pracy nie budzi większych zastrzeżeń, tekst jest sformatowany poprawnie, a rysunki staranne i czytelne. W dysertacji zawarto również wykaz ważniejszych oznaczeń, spisy rysunków oraz tabel, co zdecydowanie ułatwia jej czytanie.

2. Ocena części literaturowej

Przegląd literaturowy zawarty jest w rozdziale 2 w treści podrozdziałów od 2.1 do 2.4, które stanowią analizę aktualnego stanu wiedzy związanego z tematyką podjętej pracy doktorskiej. W rozdziałach tych Autorka opisała zagadnienia związane z tematyką pracy przedstawiając kolejno:

- podstawy technologii nagniatania,
- ogólną charakterystykę staliwa duplex,
- analizę techniczno-ekonomiczną procesów w warunkach przemysłowych,
- podsumowanie analizy aktualnego stanu wiedzy.

W treści tej części pracy Autorka w rozdziale 2 zatytułowanym „ANALIZA STANU ZAGADNIENIA” w ramach analizy aktualnego stanu wiedzy dotyczącego tematyki dysertacji przedstawiła w podrozdziale 2.1 zatytułowanym „Podstawy technologii obróbki nagniatania” ogólną charakterystykę procesu, wpływ tego procesu na właściwości materiału poddanego obróbce, zalety i wady obróbki. Następnie w podrozdziale 2.2 przedstawiła ogólną charakterystykę staliwa duplex, wymieniła gatunki staliwa oraz stali duplex podając ich oznaczenia wg różnych międzynarodowych norm wraz z tabelarycznym przedstawieniem składów chemicznych. W dalszej części tego rozdziału opisała potencjalne obszary zastosowania staliw i stali duplex biorąc pod uwagę ich właściwości. W kolejnej części tego podrozdziału Autorka opisała w jaki sposób może powstawać mikrostruktura staliw duplex wraz omówieniem wpływu chromu, molibdenu, azotu, niklu i miedzi na mikrostrukturę, właściwości technologiczne lub/i mechaniczne. Podrozdział ten zakończony jest przedstawieniem staliw austenityczno-ferrytycznych wg PN-EN 10283:19, które scharakteryzowano za pomocą składu chemicznego i właściwości mechanicznych. W dalszej części pracy w podrozdziale 2.2.1 przedstawiła ogólnie proces odlewniczy staliw duplex, a w podrozdziale 2.2.2 zwróciła uwagę na możliwości stosowania procesu nagniatania staliw duplex. W kolejnym podrozdziale Doktorantka przedstawiła analizę techniczno-ekonomiczną procesów w kontekście możliwości wdrożenia do aplikacji przemysłowych.

Rozdział zakończony jest podsumowaniem analizy aktualnego stanu wiedzy, które stanowi uzasadnienie podjęcia takiego właśnie tematu pracy i określenia hipotezy oraz celu pracy.

Ta część pracy jest dobrze przygotowana, ale odczuwam pewien niedosyt z przeprowadzonej analizy aktualnego stanu wiedzy związanego z tematyką dysertacji. Na stronie 19 Autorka opisując wpływ siły docisku w czasie procesu obróbki nagniataniem na chropowatość powierzchni stwierdziła, że *„zbyt duża wartość spowoduje wzrost chropowatości ze względu na zjawisko łuszczenia się powierzchni”*, nie wyjaśniając co jest przyczyną *„łuszczenia”*. W moim odczuciu zabrakło informacji na temat opisu - charakterystyki styku skoncentrowanego uwzględniającego tarcie toczone wraz z analizą występujących w nim sił i naprężeń, które wpływają na typ oraz rodzaj potencjalnego uszkodzenia warstwy wierzchniej. Brak określonego punktu Bielajewa, najwyższych naprężeń stycznych i zredukowanych nie pozwoli na właściwe wnioskowanie dlaczego następuje zjawisko nazywane przez Autorkę *„łuszczenie się*

powierzchni”, co jest dość istotnym zagadnieniem związanym z tematem dysertacji. Z punktu widzenia tribologii można byłoby ustalić, czy mamy do czynienia ze zjawiskiem zużycia np. przez łuszczenie (ang. *spalling*) czy może zużycie gruzełkowe (ang. *pitting*)? Pewien niedosyt budzi również brak pełnej analizy powstawania mikrostruktury staliwa duplex. Na stronie 19 na rysunku 3 Autorka przedstawiła przykładową mikrostrukturę, w której wyróżniła występujący ferryt oraz austenit. Natomiast opisując w tabeli 4 wpływ dodatków Cr, Mo, N, Ni oraz Cu na właściwości staliw i stali duplex wspomina o możliwości powstawania fazy σ oraz węglików, nie definiując ich. W analizie literatury dysertacji powinno znaleźć się wyjaśnienie jakiego rodzaju węgliki mogą występować w staliwach – stalach duplex (np. czy są to: M_7C_3 , $M_{23}C_6$) oraz co może wpływać na powstawania fazy sigma (σ -FeCr, FeCrMo)?

W treści pracy Doktorantka używa sformułowania struktura w odniesieniu do mikrostruktury, którą można obserwować i analizować przy pomocy odpowiednich metod mikroskopowych.

Na podstawie tak przeprowadzonej analizy literatury należy stwierdzić, że zebrane i przedstawione informacje stanowią dobrze prezentujący się zbiór informacji odpowiadający tematowi pracy.

Oceniając tę część pracy stwierdzam, że tak przedstawiona część literaturowa stanowi dobrą podstawę teoretyczną do realizacji podjętego tematu.

3. Hipoteza, cel i zakres badań

W rozdziale 3 zatytułowanym „CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA” zawarto podrozdział 3.1. zatytułowany „Hipoteza i cele pracy”, w którym Autorka określiła hipotezę pracy oraz cele pracy.

Autorka postawiła hipotezę pracy, która brzmi następująco: *„Zastosowanie obróbki nagniataniem bezmiedziowego staliwa duplex jest uzasadnione technologicznie i ekonomicznie, umożliwia poprawę jakości oraz właściwości funkcjonalnych wyrobu gotowego w związku z tym posiada potencjał implementacji do praktyki przemysłowej”*.

Następnie Doktorantka określiła trzy cele naukowe pracy. Pierwszy dotyczył określenia możliwości oraz zakresu kształtowania warstwy wierzchniej materiału badawczego z zastosowaniem procesu nagniatania statycznego naporowego tocznego

(NSNT), drugi oceny wpływu badanej technologii na właściwości geometryczne powierzchni staliwa duplex i trzeci wskazanie wpływu procesu NSNT na właściwości użytkowe (funkcjonalne) badanych gatunków staliwa.

W kolejnym podrozdziale 3.2 Autorka przedstawiła „Plan i zakres badań”, który jest adekwatny do sprawdzenia słuszności postawionej hipotezy.

Postawiona w tym rozdziale hipoteza jest adekwatna do założonych celów. Również przedstawiony zakres badań jest poprawny, pozwala na osiągnięcie celów i udowodnienia hipotezy rozprawy doktorskiej.

4. Ocena części merytorycznej rozprawy

Część doświadczalną pracy rozpoczyna rozdział 3.3 zatytułowany „Metodyka badań”, w którym Autorka rozprawy przedstawiła i scharakteryzowała zastosowane urządzenia do realizowanych badań. W tej części pracy opisała wykorzystane mikroskopy optyczne służące do badań mikrostruktury, profilometr służący do oceny parametrów chropowatości, nie do końca definiując w treści pracy następujące parametry: R_{max} , R_{3z} , R_q , R_t . Następnie wymieniła urządzenia, za pomocą których przeprowadziła badania mikrotwardości i twardości. W tej części uważam, że Autorka wykonując badania metodą Vickersa stosując obciążenie 9,897 N (HV1) za pomocą mikrotwardościomierza Future-Tech FM-700 wykonała badania mikrotwardości a nie twardości, ponieważ przyjmuje się, że pomiary przy obciążeniach poniżej 10 N, to pomiary mikrotwardości. Następnie opisała metodykę badań trwałości zmęczeniowej wraz z analizą makro i mikrostruktury realizowanych we współpracy z Uniwersytetem Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy. Przy opisie tych badań zabrakło informacji, które są istotne do dalszego wnioskowania, np. takich jak: jaki był rodzaj cyklu, jaka była wartość amplitudy cyklu obciążenia, itp. W dalszej części opisano metodykę badań tribologicznych wpływu procesu nagniatania na zużycie za pomocą tribometru T 05. Do badań tribologicznych Autorka przyjęła obciążenie wynoszące 5 N. Uwzględniając potencjalną aplikacyjność badanych materiałów, nie bardzo rozumiem dlaczego przyjęto tak niską wartość obciążenia, gdzie w procesie nagniatania zastosowano obciążenia 1,5 kN ($an=0,5$ mm) lub 3,0 kN ($an=1$ mm). Ponadto w tej części pracy uważam, że przeprowadzono raczej badania zużycia adhezyjnego a nie ściernego,

bowiem w czasie badań niszczenie powierzchni współpracujących elementów nie nastąpiło w wyniku skrawania, bruzdowania, rysowania powierzchni przy udziale cząstek ciał obcych (ścierniwa) lub produktów zużycia, co jest charakterystyczne dla zużycia ściernego. Podrozdział ten zakończony jest opisem metodyki badań odporności korozyjnej. W kolejnym rozdziale 3.4 Autorka opisała wybrane do badań staliwa duplex GX2CrNiMoN22-5-3 oraz GX2CrNiMoN25-6-3. Następnie opisano przygotowanie próbek do badań, opisując proces ich odlania, obróbki cieplnej, obróbki skrawaniem oraz warunki procesu nagniatania. Parametry procesu nagniatania przedstawiono w tabeli 9 oraz tabeli 10, w tej części pracy zabrakło wyjaśnienia dlaczego przyjęto taki plan eksperymentu i dlaczego nie przeprowadzono próby z podwójnym nagniataniem dla posuwu $fn=0,5$ obr/min analogicznie jak dla prób 5A oraz 5B?

W rozdziale 3.5 Doktorantka przedstawiła wyniki badań własnych, w pierwszym podrozdziale 3.5.1. zatytułowanym „Makro i mikrostruktura” przedstawiono wyniki badań z uwzględnieniem obszarów z warstwą wierzchnią (*WW*), w której widać efekty procesu nagniatania w postaci odkształcenia plastycznego mikrostruktury badanych staliw. Analizując mikrostrukturę Autorka stwierdziła, że udział faz ferrytu/austenitu wynosi 45/55% powołując się na przeprowadzone badania analizy obrazu, szkoda że wyników tych analiz nie zamieszczono w dysertacji. Następnie przedstawiono wyniki badań chropowatości powierzchni po procesie nagniatania, np. na rysunku 23 przedstawiła obraz mikrostruktury z wyraźnym zasięgiem powstałej warstwy wierzchniej oraz na rys. 24 przykładową chropowatość powierzchni z wyznaczonym parametrem *RSm* (średnia szerokość elementów profilu w pracy nazwany „średni odstęp między wniesieniami profilu”). Wyniki tych badań są wprowadzeniem do podrozdziału 3.5.2 zatytułowanego „Chropowatość”, w którym przedstawiono kompleksowe wyniki badań chropowatości powierzchni badanych staliw. W tej części pracy przedstawiono parametry chropowatości w formie tabelarycznej oraz graficznej za pomocą wykresów. Następnie Autorka przeprowadziła analizę matematyczną w oparciu o analizę korelacji liniowej Pearsona uwzględniającą parametry procesu udawadniający wysoką zależność korelacyjną między przyjętymi zmiennymi tj.: posuwem *fn* a chropowatością powierzchni *Ra*. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań mikrotwardości oraz twardości wraz z wyliczonym stopniem względnego umocnienia. Otrzymane wyniki badań są bardzo istotne z punktu widzenia technologicznego, ponieważ określają parametry procesu nagniatania NSNT

w kontekście wdrożenia wyników badań do praktyki przemysłowej. Następnie w podrozdziale 3.5.4. przedstawiono wyniki badań tribologicznych zużycia adhezyjnego, oceniając ubytek masowy próbek staliw duplex współpracujących z przeciw próbką ze stali łożyskowej 100Cr6 obciążonych siłą 5 N. W mojej ocenie obciążenie siłą 5 N wężła tarcowego typu klocek-rolka nie mógł spowodować znaczącego zużycia badanych próbek, co potwierdziły uzyskane wyniki badań. Badania te raczej mogą stanowić uzupełnienie do przedstawionych w kolejnym podrozdziale badań zmęczeniowych, w którym przeprowadzono ocenę trwałości zmęczeniowej badanych staliw. Otrzymane wyniki badań są bardzo cenne pod względem użytkowym, wskazują możliwość stosowania procesu NSNT do wytwarzania części maszyn wykonanych ze staliw duplex poddanych znacznym obciążeniom. W tej części pracy w oparciu o niepełne informacje przedstawione w metodyce badawczej uważam, że analizowany rodzaj zużycia mógł być typu zmęczenia ciernego (ang. *fretting fatigue*), co nie zostało jednoznacznie określone. Wyniki badań zmęczeniowych kończy przeprowadzona analiza korelacji liniowej Pearsona potwierdzająca wysoką zależność korelacyjną między głębokością posuwu nagniatania an a wyznaczonym polem powierzchni zmęczenia Sz .

Dobłą praktyką prac badawczych jest opracowanie błędów pomiaru, którego w pracy nie wykonano. Autorka w tej części pracy powinna uwzględnić oraz zastosować słupki błędów na wykresach przedstawiających wyniki badań.

W dalszej części pracy w podrozdziale 3.5.6 przedstawiono wyniki badań odporności na korozję w środowisku 1% roztworu wody morskiej wybranych gatunków staliw duplex. Badania te potwierdzają, że zastosowanie odpowiednich parametrów technologicznych nagniatania wpływa na zwiększenie odporności korozyjnej badanych staliw. Uzyskane wyniki badań Autorka poddała analizie w rozdziale zatytułowanym „Analiza wyników badań”, w którym syntetycznie skomentowała otrzymane wyniki potwierdzając, że zastosowanie procesu nagniatania wpływa na poprawę właściwości funkcjonalnych przy zastosowaniu odpowiednio dobranych parametrów technologicznych procesu nagniatania statycznego naporowego tocznego. Otrzymane wyniki badań w ramach realizacji pracy doktorskiej wraz z wytycznymi technologicznymi procesu NSNT mogą stanowić podstawę wdrożenia do praktyki przemysłowej przedsiębiorstwa PGO S.A Pioma Odlewnia w Piotrkowie Trybunalskim.

W celu przeprowadzenia oceny możliwości wdrożenia w rozdziale 3.7 Doktorantka, przeprowadziła wielokryterialną analizę oceniającą potencjał wdrożenia procesu nagniatania do praktyki gospodarczej. Z przeprowadzonej przez Doktorantkę analizy techniczno-ekonomicznej wynika, że wyniki pracy doktorskiej są opłacalne do wdrożenia do praktyki przemysłowej wytypowanego przedsiębiorstwa.

Merytoryczną część pracy kończy rozdział 4 zatytułowany „Podsumowanie”, który jest ogólnym podsumowaniem otrzymanych wyników badań oraz rozdział 5 zatytułowany „Wnioski końcowe”, w którym syntetycznie sformułowano jedenaście wniosków wynikających z przeprowadzonych badań.

Przy analizie tej części pracy nasuwają się pewne uwagi, które przedstawiam poniżej.

1. Dlaczego do badań tribologicznych zastosowano siłę obciążającą wynoszącą 5N?
2. Jak zmieniała się wartość współczynnika tarcia w czasie cyklu tarcia? – Jak zostały wytypowane wartości współczynnika tarcia, które przyjęto do tabeli 17 str. 79 oraz tabeli 18 str. 80?
3. Dlaczego wykonując badania nagniatania nie przeprowadzono próby z podwójnym nagniataniem dla posuwu $f_n=0,5$ obr/min analogicznie jak dla prób 5A oraz 5B?

Chcę podkreślić, że określenie możliwości kształtowania warstwy wierzchniej wybranych staliw duplex przy zastosowaniu procesu nagniatania statycznego naporowego tocznego oraz przeprowadzenie wielokryterialnej analizy możliwości wdrożenia wyników badań do praktyki przemysłowej, potwierdza dojrzałość naukową Autorki rozprawy.

5. Ocena końcowa

Wymienione powyżej sugestie i uwagi krytyczne w niczym nie umniejszają pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy zarówno pod względem zastosowanych metod badawczych, jak też uzyskanych wyników badań i ich interpretacji. Autorka wykazała się wiedzą, umiejętnością w prowadzeniu eksperymentów, opracowania i analizy wyników, a także poprawnego wnioskowania. Doktorantka zrealizowała przyjęty zakres merytoryczny pracy osiągając przyjęte cele naukowe oraz udowodniła postawioną hipotezę rozprawy.

W tym miejscu podkreślić należy również bogaty dorobek publikacyjny mgr inż. Joanny Jasińskiej, który stanowi 22 pozycje.

Podsumowując należy podkreślić, że opracowanie wytycznych technologii procesu nagniatania statycznego naporowego tocznego bezmiedziowego staliwa duplex wpływającego na poprawę właściwości warstwy wierzchniej dwóch gatunków staliwa duplex GX2CrNiMoN22-5-3 i GX2CrNiMoN25-6-3 wraz z możliwością wdrożenia wyników badań do praktyki przemysłowej jest niewątpliwie istotnym osiągnięciem autorskim Doktorantki.

Wniosek końcowy

Na podstawie powyższej opinii o rozprawie doktorskiej mgr inż. Joannie Jasińskiej, zatytułowanej „Ocena właściwości funkcjonalnych bezmiedziowego staliwa duplex po procesie nagniatania statycznego naporowego tocznego” reprezentującej dyscyplinę **Inżynieria Materiałowa** stwierdzam, że spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U.nr 65 z dnia 16 kwietnia 2003 roku poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 z dnia 20 lipca 2018 roku poz. 1668 z późniejszymi zmianami), przedkładam więc Wysokiej Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Częstochowskiej wniosek o dopuszczenie **mgr inż. Joannę Jasińską** do publicznej obrony. Dodatkowo biorąc pod uwagę wysoki poziom opiniowanej pracy doktorskiej uprzejmie wnoszę **wniosek o wyróżnienie** przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

24.05.2022 r.
Dezyna Papiejko