

dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. uczelni
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
Zakład Technologii Materiałów Konstrukcyjnych i Spajania
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
dariusz.fydrych@pg.edu.pl

Gdańsk, 13 marca 2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej-Bodzak pt.:

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

wykonanej pod opieką promotora Pana dr. hab. inż. Mariusza Walczaka, prof. uczelni
oraz promotora pomocniczego Pana dr. inż. Mirosława Szali
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Lubelskiej
z dnia 14 stycznia 2022 r.

1. Wprowadzenie

Jednym z głównych kierunków naukowo-badawczych we współczesnej inżynierii mechanicznej jest kształtowanie właściwości fizyko-chemicznych elementów maszyn, co umożliwia ich wykorzystywanie w rozwiązaniach technicznych. Różne procesy technologiczne mogą być stosowane do nadawania elementom określonych cech mechanicznych, korozyjnych, geometrycznych, termodynamicznych i estetycznych. Jednak w wielu przypadkach stan wiedzy w tym zakresie wymaga ciągłego uzupełniania o informacje o charakterze zarówno podstawowym, jak i stosowanym. Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest nagniatanie strumieniowe stali stopowych z dwóch grup materiałowych zaliczanych do stali odpornych na korozję, co wpisuje się w ww. trendy. W przypadku stali odpornych na korozję modyfikacja powierzchni skutkująca poprawą ich właściwości eksploatacyjnych przyczynia się do rozszerzenia zakresu ich stosowania poza obszary tradycyjne (środowiska agresywne).

Pani mgr inż. Anna Rzepecka-Bodzak podjęła się realizacji pracy naukowej, która jest jednocześnie bardzo ściśle związana z praktyką przemysłową. Wpisuje się to w aktualnie światowe trendy i zalecenia ministerialne. Cel, zakres tematyczny i metodyka badawcza wskazane w rozprawie doktorskiej są dopasowane do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. W świetle analizy aktualnego stanu literatury przedmiotu pracy podjęcie przez Doktorantkę takiej tematyki uważam za w pełni uzasadnione, ponieważ jest ona oryginalna, interesująca z perspektywy naukowej, a przede wszystkim ważna z praktycznego punktu widzenia. Uważam również, że Doktorantka odpowiednio rozłożyła nacisk na akcenty przemysłowe i naukowe.

2. Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Struktura opiniowanej rozprawy doktorskiej odpowiada klasycznemu układowi IMRaD. Pierwszych dziesięć stron zawiera wykaz wybranych symboli i skrótów oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Trzon pracy składa się z ośmiu numerowanych rozdziałów przedstawionych na 145 stronach, które obejmują trzy główne części: wstęp (jeden rozdział), stan zagadnienia w świetle literatury (dwa rozdziały), rozdział obejmujący cele, tezę i zakres pracy, badania własne (cztery rozdziały), wnioski końcowe oraz bibliografię i załączniki.

Wstęp zawiera informacje wprowadzające do zagadnień ściśle związanych z podjętą tematyką. W dwóch kolejnych rozdziałach Autorka przeprowadza przegląd literatury bezpośrednio związanej z treścią rozprawy, opisuje zagadnienia związane z procesami nagniatania: ideą, obszarami zastosowania, wpływem na morfologię i właściwości warstwy wierzchniej. Uważam, że ta część dobrze wprowadza czytelnika do aktualnego stanu wiedzy. Studium literaturowe zostało zakończone podsumowaniem, w którym Doktorantka dobrze umotywowała celowość podjęcia tematu. Na stronie 62. rozprawy przedstawiono cele, tezę i zakres pracy. Cele pracy są postawione jasno i poprawnie. Teza brzmi: „Istnieje związek między parametrami obróbki nagniatania strumieniowego (shot peeningu) a strukturą warstwy wierzchniej, właściwościami mechanicznymi i przeciwzużyciowymi stali AISI 304 i AISI 413” i, moim zdaniem, jest sformułowana prawidłowo. Zakres pracy (program badań) umożliwiający osiągnięcie celów został dodatkowo zaprezentowany w czytelnej formie schematu blokowego. Na główną i najobszerniejszą część pracy składa się opis realizacji i wyników badań własnych. Autorka scharakteryzowała w rozdziałach 5 i 6 zastosowane materiały oraz metodykę badawczą. Rozdział 7 (strony 78-142) poświęcony jest prezentacji wyników badań, kolejno: intensywności procesu nagniatania, pomiarom mikrotwardości nagniatanych próbek, badaniom struktury geometrycznej powierzchni, analizom XRD i mikroskopowym, badaniom wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na zużycie ścierne i kawitacyjne. Dyskusja wyników poszczególnych badań została przeprowadzona we właściwych podrozdziałach. Praca została zakończona sformułowaniem wniosków wynikających z przeprowadzonych prac badawczych.

Bibliografia obejmuje 116 źródeł literaturowych (różnorodne i uzasadnione merytorycznie pozycje z całego świata: artykuły z czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych, książki, a także normy i patenty), w tym 3 pozycje autorstwa Doktorantki. Wszystkie źródła zostały zacytowane w treści pracy.

W zakresie oceny struktury pracy nasuwa mi się następująca uwaga: tytuły i kolejność podrozdziałów (dotyczy to zamienionej kolejności podrozdziałów o odporności kawitacyjnej i ściernej) w rozdziałach 6. i 7. nie są analogiczne. Poza tym pod względem strukturalnym i formalnym praca jest skomponowana prawidłowo.

Do najważniejszych usterek technicznych występujących w rozprawie można zaliczyć:

- strony ze spisem treści zasadniczo nie powinny być numerowane.
- niekonsekwentny sposób cytowania źródeł przy wymienianiu/klasyfikacji w punktach, np. inny na stronach 16, 17, 18 i 19, a inny na stronach: 20 i 21.
- występowanie błędów edycyjnych, gramatycznych i stylistycznych, np. w zdaniach (strona 12): „W tym czasie technologia procesu rozwinęła się bardzo szeroko, że aktualnie można odnaleźć wiele odmian procesu, takich jak nagniatanie statyczne czy dynamiczne” i „...element roboczy przekazuje energię kinetyczną powierzchni obrabianej, której źródłem jest czynnik roboczy...”.
- strona 58: W pierwszym akapicie występuje błędne odwołanie do rozdziału 6.
- w tabeli 5.2. zestawiono oznaczenia próbek, natomiast w pracy są stosowane inne.

- przełomy pokazane na rysunkach 7.29 i 7.30 powinny być bardziej szczegółowo opisane, ze wskazaniem (np. strzałkami) obszarów charakterystycznych.
- strona 105: tytuł akapitu powinien być pogrubiony.
- podrozdział 7.7: na zdjęciach próbek po testach ścierania nie widać wartości powiększenia.
- opis bibliograficzny kilku pozycji literaturowych (88, 92, 110, 112, 114) wymaga poprawek lub uzupełnień.

Praca napisana jest językiem przystępnym, jednak pojawiają się w kilku jej miejscach tzw. skróty myślowe, np.:

- „Oprócz zmiany składu chemicznego zwiększenie temperatury pracy możliwe jest przez zmianę technologii wytwarzania i zastosowanie powłok ochronnych” (strona 27). Powinno być: „zwiększenie maksymalnej temperatury pracy”.
- „Mikrotwardość należy do badań właściwości mechanicznych i jest szeroko wykorzystywanym testem”. Oczywiście, mikrotwardość nie jest testem.
- „Celem wykonanych badań pomiarów mikrotwardości było określenie zmian mikrotwardości podczas zastosowania różnych wartości”. Pomiary mikrotwardości nie umożliwiają oceny właściwości materiału w trakcie procesu, a jedynie po jego zakończeniu.

Ponadto zauważyłem występowanie powtórzeń, np. w dwóch pierwszych akapitach podrozdziału 3.1. Znalazłem również kilkanaście błędów interpunkcyjnych oraz literówek, które wynikły prawdopodobnie z funkcjonowania autokorekty edytora tekstu.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest weryfikacja skuteczności nagniatania strumieniowego jako procesu wpływającego na właściwości eksploatacyjne dwóch wybranych gatunków stali odpornych na korozję o różnych strukturach: austenitycznej i martenzytycznej. Analizując zakres i treść pracy stwierdzam, że wpisuje się ona w dyscyplinę naukową: Inżynieria Mechaniczna. Pracę uważam za oryginalną, interesującą i wartościową pod względem merytorycznym i praktycznym. Doktorantka prawidłowo zrealizowała zadania badawcze będące przedmiotem rozprawy: zaplanowała i przeprowadziła złożone i komplementarne badania doświadczalne wykorzystując w tym celu nowoczesne metody badawcze służące ocenie budowy strukturalnej i właściwości eksploatacyjnych stali stopowych po zastosowaniu nagniatania strumieniowego. Dla osiągnięcia celów rozprawy Autorka wykorzystwała szerokie spektrum metod badawczych m.in.: XRD, SEM, EDS, badania tribologiczne, erozji kawitacyjnej, zmęczeniowe, pomiary twardości. Na koniec Autorka prawidłowo zinterpretowała wyniki badań. Do najważniejszych zalet i osiągnięć opisanych w pracy zaliczam:

- szeroki i komplementarny zakres badań właściwości eksploatacyjnych badanych materiałów, zwłaszcza rozszerzenie tego zakresu o badania erozji kawitacyjnej powierzchni próbek, co jest zauważalnym uzupełnieniem aktualnego stanu wiedzy,
- zastosowanie naukowych metod badawczych prowadzących do wdrożenia wyników pracy w podmiocie zewnętrznym,
- wykorzystanie do analizy wyników badań testów statystycznych np. do weryfikacji hipotezy o równości średnich oraz czytelne przedstawienie wyników badań w postaci wykresów pudełkowych (ramka-wąsy).

Podczas lektury pracy nasunęły mi się następujące uwagi i komentarze o charakterze merytorycznym:

- w programie badań pokazanym na rysunku 4.1 badania fraktograficzne zaliczono do badań ilościowych. Jednak w dyskusji wyników odczuwalny jest brak ilościowego aspektu opisu tych badań. Ilościowa analiza wymaga wyrażenia wyników w postaci wykresów albo procentowego udziału pola powierzchni danego rodzaju przełomu w całkowitym polu powierzchni badanego przełomu. Takie podejście zostało uwzględnione jedynie w opisie przedstawionym na stronie 104.
- opis wyników pomiarów prędkości erozji nie jest zgodny z wykresem pokazanym na rysunku 7.62.
- przedstawione w pracy wnioski są wprawdzie poprawne merytorycznie, jednak brakuje w nich podejścia ilościowego. Dodanie wartości i względnych zmian wartości wyników jako uzupełnienie ogólnych sformułowań: „powoduje spadek”, „osiąga niższe” itp. umożliwiłoby sformułowanie wniosków szczegółowych.
- strona 29: „Skutkiem oddziaływania wysokiej temperatury jest pojawienie się zjawiska rozszerzalności cieplnej materiału.”. Rozszerzalność cieplna materiału nie jest skutkiem oddziaływania wysokiej temperatury.
- strona 33: Doktorantka pisze, że „Stwierdzono także, że na głębokości 125 μm twardość fazy austenicznej jest znacznie wyższa niż w fazie ferrytycznej. Identyczne wnioski wyciągnęli również Sugavaneswaran i in. [43]...”. W pracy [43] autorzy badali tylko stal austeniczną, bez porównywania jej z innymi gatunkami stali.
- dane zamieszczone w tabeli 3.3. nie są skomentowane w tekście.
- podpisy rysunków 2.6, 3.2, 3.9, 7.24, 7.25 są błędnie sformułowane.

W pracy występuje również kilka zdań zawierających niefortunne sformułowania, np.:

- „Kolejny przykład porównał...” (strona 58).
- „Śrut ten charakteryzuje się białym kolorem, kulistą i gładką powierzchnią, wysoką wytrzymałością, ale niezbyt agresywną w stosunku do wykorzystywanego sprzętu i narzędzi, obojętnością chemiczną, nie zanieczyszcza obrabianych części oraz nie wytwarza dużych ilości pyłów” (strona 69).
- „Pomiary twardości przeprowadzono mierząc twardość...” (strona 71).
- „...od samego początku stal AISI 413 jest stalą twardszą...” (strona 96).
- „Rysunki 7.49–7.52 przedstawiają zależności powstałe między współczynnikiem tarcia powstałym podczas badań ścieralności a...” (strona 118).
- „...prędkość...była...wolniejsza...” (strony 127 i 128).

Podsumowując, pomimo przedstawionych uwag i wątpliwości, rozprawę pod względem formalnym i merytorycznym oceniam jednoznacznie pozytywnie. Wszystkie powyższe i inne drobniejsze uwagi omówiłem z Doktorantką.

4. Uwagi

Bardzo proszę o odpowiedź na uwagi i pytania, które wyszczególniam poniżej:

1. Mam zastrzeżenia do przyjętej w pracy wartości poziomu ufności α . Standardową wartością jest $\alpha=0,05$. Doktorantka przyjmuje różne wartości tego parametru statystycznego w różnych analizach. Na przykład na stronie Autorka podaje 3 wartości, co tłumaczy następująco: „Analiza wyników wymusiła zmianę poziomów ufności”. Czy można poprzeć taki sposób postępowania podczas analiz statystycznych źródłami literaturowymi?

2. W opisach wyników podsumowujących badania wyraźnie brakuje komentarza dotyczącego weryfikacji postawionej w rozdziale 4. tezy rozprawy. Czy teza pracy została potwierdzona w całości? Na stronie 126 Autorka podaje, że: „Wyniki te potwierdzają tezę przedstawioną powyżej, tj. proces nagniatania pozytywnie wpływa na odporność stali AISI 304 na erozję kawitacyjną”, jednak jest to komentarz dotyczący tylko jednego gatunku stali i jednego rodzaju badań.
3. W zdaniu (strona 20): "Warstwa wierzchnia posiada swoje unikalne właściwości i własności..." Autorka używa dwóch podobnych semantycznie terminów. Proszę o wyjaśnienie, jak należy je rozumieć.
4. Strona 21: „Z jednej strony ukazuje się fragment z odsłoniętą warstwą wierzchnią...”. Czy można odsłonić warstwę wierzchnią?
5. Strona 25: „Dodatkowo proces ten umożliwił podwyższenie jakości elementów przez określenie maksymalnej wartości dopuszczalnych obciążeń, a tym samym z ustaleniem wysokich współczynników bezpieczeństwa eksploatowanych kół”. Oprócz niepoprawności gramatycznej występuje w tym zdaniu błąd merytoryczny. Czy można traktować określenie maksymalnej wartości dopuszczalnych obciążeń jako metodę podwyższenia jakości elementów?
6. Wyniki pomiarów zużycia kawitacyjnego są podane na stronach: 125, 132, 133 i 135. Podobnie wyniki głębokości erozji (strony 128, 137 i 138). Mam wątpliwości, czy było to konieczne.
7. Wnioski powinny być sformułowane wyłącznie na podstawie zaprezentowanych w pracy badań własnych. W wniosku 2 w części dotyczącej stopnia pokrycia Doktorantka zacytowała źródło [1]. Poza tym w części badawczej Autorka nie opisała wyników stopnia pokrycia.

Powyższe komentarze nie umniejszają pozytywnej oceny, na którą zasługuje przedstawiona do recenzji rozprawa, a niektóre z nich mają charakter dyskusyjny. Mam nadzieję, że moje uwagi będą stanowiły bodziec do naukowej dyskusji i okażą się przydatne w dalszych pracach Autorki.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa jest oryginalna i ma charakter zarówno poznawczy, ponieważ wnosi nowe elementy do wiedzy o właściwościach eksploatacyjnych stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej i martenzytycznej, jak i niewątpliwie aplikacyjny, gdyż jej wyniki zostały wdrożone do praktyki produkcyjnej. Autorka prawidłowo zaplanowała i wykonała badania oraz poprawnie zinterpretowała ich wyniki, czym udowodniła umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Dojrzałość badawczą Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej-Bodzak potwierdza dobór właściwych, różnorodnych, a jednocześnie komplementarnych i nowoczesnych metod badawczych, które umożliwiły osiągnięcie celu pracy, sformułowanie wniosków, sporządzenie raportu z badań w formie rozprawy naukowej oraz wdrożenie wyników pracy do zastosowania przemysłowego.

Opiniowana praca doktorska spełnia w pełni wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z roku 2018 pozycja 1668) oraz wcześniejsze regulacje prawne (w szczególności Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku: tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 882 ze zmianą; Dz. U. z 2016 r. poz. 1311) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Anny Rzepeckiej-Bodzak do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Sporządził:

Dariusz Fydyga 5

