



Lublin, dn. 2023-05-22

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej pt.:

„Wpływ obciążenia kawitacyjnego na proces niszczenia wybranych materiałów”

wykonanej pod opieką promotora Pani dr hab. inż. Alicji Krelli, prof. IMP PAN

Uwaga formalna

Opinię niniejszą opracowano na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN, na podstawie przesłanego do mnie pisma Z-cy Dyrektora ds. naukowych dr hab. inż. Grzegorza Żywicę, prof. IMP PAN z dnia 14 marca 2023 r.

1. Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej przedstawiona została w postaci zwartego opracowania na 124 stronach formatu A4. Struktura opracowania nie odbiega od przyjętych standardów dla tego typu prac i została logicznie podzielona na 12 numerowanych rozdziałów. Pierwszy rozdział (wstęp) został poprzedzony wykazem symboli, skrótów i oznaczeń odnoszących się m. in. do równań oraz bardzo starannie przygotowanych wykresów, co ułatwia interpretację i analizę treści, a przy tym podnosi jakość opracowania rozprawy. Kolejne rozdziały obejmują kolejno: analizę stanu literatury (sześć rozdziałów), tezy, cele i zakres pracy, metodykę badań, wyniki badań, dyskusję wyników badań, walidację korelacji literaturowych oraz nienumerowane rozdziały stanowiące wnioski i bibliografię. Wstęp zawiera informację wprowadzającą do złożonej problematyki jakim jest erozja kawitacyjna. W kolejnych rozdziałach 2 ÷ 7 dokonano przeglądu danych literaturowych związanych z problematyką rozprawy, gdzie scharakteryzowano zjawisko kawitacji, przedstawiono informacje wprowadzające do opisu wpływu wybranych właściwości mechanicznych na erozję kawitacyjną ze szczególnym uwzględnieniem twardości, energii odkształcenia, wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności, wydłużenia i wytrzymałości zmęczeniowej. Z kolei w rozdziale piątym opisano wpływ chropowatości powierzchni,

a w rozdziałach 6 i 7 scharakteryzowano podatność jedno- i dwufazowych stali na erozję kawitacyjną. Te dwa ostatnie rozdziały stanowią w zasadzie uzasadnienie dla doboru materiałów zastosowanych w części eksperymentalnej. Część przeglądowa pracy kończy się podsumowaniem z przeprowadzonych studiów literaturowych uzasadniającym sformułowane trzy tezy oraz cel pracy. Szkoda, że w tym miejscu zabrakło zwartych w chociażby w wypunktowanej formie pewnych konkluzji z tego przeglądu literatury. Tezy i cel pracy postawione są jasno i w miarę poprawnie. Ponadto Doktorantka określa szeroki zakres prac umożliwiających osiągnięcie postawionego celu. Cel, zakres tematyczny i metodyka badawcza wskazane w rozprawie doktorskiej są dopasowane do dyscypliny *inżynieria mechaniczna*. Kolejny rozdział 9 poświęcony jest opisom stanowiska pomiarowego i przyjętej metodyce badawczej oraz charakterystyce badanych gatunków stali. W rozdziale 10 zamieszczono *wyniki badań* dla każdej stali z osobna we właściwych podrozdziałach. Rozdziały 11 i 12 to odpowiednio kolejno rzetelnie i starannie przeprowadzona *dyskusja wyników badań* oraz *walidacja korelacji literaturowych* obszernie zrealizowane w sumie na 25 stronach. Część praktyczna pracy zakończona jest sformułowaniem 9 wniosków wynikających z przeprowadzonych prac badawczych i analiz.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 179 pozycji i w ocenie recenzenta jest on wystarczający do wnikliwie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy w obszarze tematu rozprawy. Głównie jest to literatura zagraniczna o zasięgu międzynarodowym, przy czym ok. 50% (90/179) pozycji literatury jest nie starsza niż 10 lat, co dodatkowo świadczy o tym, że tematyka badawcza jest aktualna i warta podejmowania dalszych badań w tym zakresie. Zaznaczyć należy przy tym, że nie zabrakło pozycji współautorskich Doktorantki – 3 cytowane pozycje, chociaż posiada ona bardziej znaczący dorobek publikacyjny w obszarze inżynierii powierzchni oraz tematyki zużycia prezentowane m. in. w uznanych czasopismach: *Wear*, *Materials*, *Tribology International* itp. Podkreślić należy, że zacytowane przez Doktorantkę pozycje literatury zostały dobrane we właściwy sposób zarówno w analizie stanu wiedzy, jak i w dyskusji wyników oraz walidacji korelacji literaturowych.

Układ pracy jest jasny i przejrzysty. Doktorantka w sposób prawidłowy opanowała stosowanie zwrotów i opisów technicznych, a terminologia i pojęcia stosowane w pracy są stosowane zasadniczo poprawnie.

Tytuł przedstawionej rozprawy „*Wpływ obciążenia kawitacyjnego na proces niszczenia wybranych materiałów*” w pełni koresponduje z treścią zawartą w pracy.

Mimo na ogół bardzo starannej redakcji pracy, Doktorantka nie ustrzegła się pewnych niedociągnięć i nieścisłości. Niektóre sformułowania są użyte w pracy niezręcznie lub niewłaściwie, ale nie umniejszają one wartości rozprawy:

- str. 1 ujęte w wykazie oznaczeń p_1 i p_2 są zdublowane na początku i na końcu strony;

- str. 11 jest „...w różnych dyscyplinach przemysłu” nie ma dyscyplin przemysłu, poprawnie powinno być – „...w różnych gałęziach przemysłu”;
- str. 29 nieprecyzyjne sformułowanie – „czyste żelazo”, może chodziło o „czyste technicznie żelazo”, bądź stop Armco?;
- str. 36 podano nieprawidłowy zapis z normą AISI gatunków stali nierdzewnych „...AISI 1.4301 oraz AISI 1.4541” poprawnie wg American Iron and Steel Institute powinno być - „AISI 304 oraz AISI 321”;
- str. 52 w nagłówku podano „Stal ferrytyczno-perlityczna S3235JR” powinno być „...S235JR”, błąd ten powielono również w spisie treści;
- str. 57 w nagłówku „...(Parametr Ra)” powinno być poprawnie „...(parametr Ra)”;
- str. 110 rys. 12.5e jednostka R_m podana jest w „Mpa” a prawidłowo powinno być w „MPa”;
- str. 113 wniosek 5 – literówka „...rośną wartości...” powinno być „...rosną wartości...”
- brak konsekwencji w podawaniu oznaczeń gatunków stali, wybrane gatunki oznaczane są wg normy PN-EN inne wg normy AISI, UNS lub SAE. Doktorantka w części eksperymentalnej pracy dla stali odpornych na korozję stosuje oznaczenia w systemie cyfrowym, a dla stali konstrukcyjnych oznaczenia zgodne z normą PN-EN. Skoro praca realizowana jest w języku polskim to należy używać oznaczeń stali zgodnie z normą PN-EN w *systemie znaków*. Autorka wprawdzie w nawiasach stara się podawać wspólnie dla wszystkich gatunków stali oznaczenia w *systemie cyfrowym*, niemniej jednak w kilku miejscach umknęło jej to uwadze. Ponadto oznaczeń w *systemie cyfrowym* unika się w pracach naukowych, jest on z kolei znamieny dla katalogów handlowych.

Mając na uwadze powyższe stwierdzenia, pod względem formalnym praca została opracowana poprawnie, jej struktura odpowiada przyjętym zasadom dla rozpraw doktorskich, a objętość wynika z potrzeby opisu przeprowadzenia obszernego programu badań.

2. Ocena merytoryczna pracy

Erozja kawitacyjna stanowi poważny problem eksploatacyjny, którego mechanizm nie jest jeszcze na tyle dokładnie poznany, aby można go opisać niezawodnym uniwersalnym modelem matematycznym i swobodnie wykorzystać w praktyce inżynierskiej dla szerokiej grupy materiałów wielofazowych. Dotychczas dostępne w literaturze opracowania empiryczne słuszne są jedynie dla określonej wąskiej grupy materiałów i to przy założonych z góry pewnych uproszczeniach. Jak wskazuje Doktorantka w uzasadnieniu dostępne w literaturze informacje nie umożliwiają oszacowania odporności erozyjnej stali na podstawie opracowanych korelacji. Tematykę badań

uważam za aktualną i istotną nie tylko z naukowego punktu widzenia ale również utylitarnego, gdzie uzyskane wyniki badań wpływu intensywności obciążeń kawitacyjnych mogą stanowić cenną informację dla konstruktorów i technologów przy doborze materiałów, projektowaniu maszyn i instalacji pracujących w środowiskach przepływowych. Doktorantka zwraca uwagę na złożoność procesu niszczenia kawitacyjnego powierzchni materiałów w zależności od struktury materiału i właściwości warstwy wierzchniej. Zazwyczaj kawitacja rozpatrywana jest jako niepożądany proces, w przeglądzie stanu wiedzy Autorka wskazuje również pozytywne strony tego zjawiska wykorzystane w ostatnim czasie jako alternatywna metoda dla konwencjonalnych technik nagniatania prowadzących do umocnienia warstwy wierzchniej. W pracy dokonano analizy wpływu intensywności obciążeń kawitacyjnych zdefiniowanych za pomocą prędkości przepływu cieczy na szybkość erozji oraz ubytek masy i zmian zachodzących w warstwie wierzchniej testowanych stali, w tym zmiany twardości oraz chropowatości powierzchni. Badano także wpływ mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych wybranych gatunków stali na intensywność niszczenia.

Na wskutek wnikliwie przeprowadzonej analizy literatury uwidacznia się brak jednoznaczności danych literaturowych dotyczących wpływu parametrów mogących wpływać na zjawisko degradacji materiałów wywołane procesami kawitacyjnymi, a w niektórych przypadkach oceny np. wpływu mikrostruktury czy obróbki cieplnej na erozję kawitacyjną dostępne w literaturze informacje są sprzeczne. Stąd wynikała m.in. potrzeba badań podjętych w powyższym obszarze. Doktorantka odnajduje więc lukę, dotyczącą braku informacji na ten temat. Dlatego też wybór tematyki pracy jest w pełni uzasadniony, a sformułowanie tematu rozprawy poprawne.

Na podstawie analizy stanu wiedzy Doktorantka sformułowała cel pracy:

„Celem pracy była dokładna analiza wpływu intensywności obciążeń kawitacyjnych definiowanych za pomocą prędkości przepływu cieczy na odporność kawitacyjną wybranych stali.”

oraz przyjęła 3 tezy:

- „1. Intensywność obciążeń definiowana przez prędkość przepływu cieczy wpływa na proces erozji kawitacyjnej stali.*
- 2. Własności mechaniczne mają istotny wpływ na proces erozji kawitacyjnej stali.*
- 3. Intensywność obciążeń kawitacyjnych oraz własności mechaniczne stali determinują proces oraz obszar erozji warstwy wierzchniej (parametr R_a chropowatości powierzchni i rozkład twardości w głąb). Rozkład twardości w głąb w wyniku oddziaływania kawitacji jest zależny od erozji warstwy wierzchniej.”*

Przedstawione przez Doktorantkę cel i tezy uważam za właściwe, sformułowane w miarę jasno i klarownie. Przy czym teza 3 pomimo poprawnego sformułowania, jest rozbudowana i przez to może wydawać się nieco zawiła, a zagadnienia warstwy wierzchniej zostały zawężone do parametru chropowatości Ra i rozkładu twardości.

Przedmiot badań stanowiły dwie stale konstrukcyjne gat. S235JR i S355J2 oraz dwa gat. stali odpornych na korozję X5CrNi18-10 (AISI 304) i X6CrNiTi18-10 (AISI 321). Chociaż wybrano modelowe stale konstrukcyjne pod względem obszaru aplikacji i związanych z tym zjawisk degradacji wynikających ze strony środowiska pracy to pod względem dwufazowej struktury ferrytyczno-perlitycznej raczej mało reprezentatywne.

Doktorantka właściwie zaplanowała i zrealizowała program badań. Dla osiągnięcia celu i udowodnienia tez wykorzystała szerokie spektrum metod badawczych obejmujących m. in. obróbkę cieplną, mikroskopową analizę metalograficzną oraz SEM, stanowiskowe badania kawitacyjne, pomiary ubytków masy, pomiary twardości metodą Vickersa i analizy profilometryczne wspomagane oprogramowaniem Matlab. Metodologia badań i zrealizowany program jest dobrze opisany i świadczy o szerokiej wiedzy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktorantki w obszarze współczesnych metod pomiarowych i planowania eksperymentu. Pewien niedosyt stanowi fakt, że w pracy zabrakło metodyki pomiaru wielkości ziaren dla stali w stanie dostawy i po obróbce cieplnej.

Wykonano obszerne i czasochłonne badania powierzchni po testach kawitacyjnych poparte graficznymi zestawieniami. Stanowią one bardzo silną stronę tego opracowania na podstawie, których Autorka dokonała m. in. wnikliwej analizy procesów zniszczenia oraz identyfikacji mechanizmów. Stopień uszkodzenia powierzchni po testach erozji kawitacyjnej został udokumentowanych licznymi dobrej jakości zdjęciami SEM i mapami chropowatości z wykorzystaniem siatki pomiarowej, co dodatkowo podwyższa walory edycyjne recenzowanej pracy i należy szczególnie docenić.

Całość pracy dopełnia 9 wniosków z przeprowadzonych badań, które dobrze się komponują z postawionymi tezą i celami pracy.

Podsumowując rozprawa jest oryginalna i ma charakter przede wszystkim poznawczy, ponieważ wnosi nowe elementy do wiedzy o procesach kawitacji stali konstrukcyjnych i odpornych na korozję bazujących na strukturze austenitycznej jak i niewątpliwie użyteczny, gdyż wyniki z badań mogą stanowić cenną informację dla konstruktorów, przy doborze materiałów w przypadku elementów szczególnie narażonych na erozję kawitacyjną.

Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej należą (tzw. mocne strony pracy):

1. Atutem pracy jest opracowanie na podstawie uzyskanych zależności chropowatości powierzchni autorskiego wzoru umożliwiającego oszacowanie przybliżonych ubytków masy. Warto w tym miejscu zaakcentować fakt, że wzór ten został opublikowany w czasopiśmie *Tribology International* (200 pkt MEiN) – <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108431>
2. Silną stroną recenzowanej rozprawy jest starannie przeprowadzona walidacja korelacji literaturowych w oparciu o uzyskane wyniki badań kawitacyjnych, poszerzająca wiedzę w obszarze opisu procesów kawitacyjnych, gdzie Autorka wskazuje na potrzebę kontynuacji i kierunku przyszłych badań.
3. Bardzo szeroki i komplementarny zakres badań związanych z oceną czynników i właściwości mechanicznych, strukturalnych oraz chropowatość powierzchni mających wpływ na erozję kawitacyjną badanych gatunków stali. Zwłaszcza rozszerzenie tego zakresu o w/w walidację. Co jest zauważalnym uzupełnieniem i rozszerzeniem aktualnego stanu wiedzy obejmującym przede wszystkim zagadnienia inżynierii powierzchni bardzo dobrze wpisujące się w dyscyplinę - inżynieria mechaniczna.
4. Poszerzenie wiedzy z zakresu charakterystyki chropowatości powierzchni na różnych etapach badań kawitacyjnych realizowanych w tunelu kawitacyjnym, pod tym względem wyniki badań można uznać za dość unikatowe, gdyż obejmują jedynie prace Autorki i Promotora rozprawy. Ciekawym podejściem badawczym przy tego typu analizie stanu warstwy wierzchniej jest autorskie zaproponowanie siatki pomiarowej chropowatości w trakcie badań kawitacyjnych, co znalazło przełożenie na publikacje zespołu pod kierunkiem Pani Promotor w uznanych wysokopunktowanych periodykach naukowych takich jak: *Wear*, *Materials* czy *Tribology International*.

3. Uwagi, wątpliwości i zapytania

Pomimo bardzo dobrego odbioru pracy oraz wysokiej oceny pod względem merytorycznym, podczas zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęły mi się pewne pytania i uwagi. Proszę o ustosunkowanie się do wyszczególnionych poniżej:

1. W pracy nie podano czy pomiary chropowatości były realizowane wg normy. Stąd też, kieruje zapytanie do Doktorantki o wybór odcinka elementarnego, w szczególności przy pomiarach chropowatości dla próbek S355J2-OC (przy prędkości przepływu 2,30 m/s i 2,49 m/s) oraz dla próbek S235JR-OC (przy prędkości przepływu 2,49 m/s).

2. Na stronie 43 podano nieprecyzyjnie „*Dobór materiałów wynikał z mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych badanych stali*”. Proszę uściślić powyższe sformułowanie, czym podyktowany był dobór dwóch bliskich pod względem składu chemicznego i struktury gatunków stali konstrukcyjnych S235JR i S355J2 oraz również podobnych pod względem właściwości mechanicznych i strukturalnych dwóch gatunków stali odpornych na korozję AISI 304 i AISI 321?
3. Proszę uzasadnić wykonanie obróbki cieplnej w przypadku stali konstrukcyjnych 235JR i S355J2, gdyż te stasowane są w stanie dostawy bez obróbki cieplnej.
4. Niewątpliwie wartością dodaną z badań obróbki cieplnej w pracy są informacje o zmieniającym się rozmiarze ziaren. Niestety brak jest w pracy metodologii pomiaru wielkości ziaren. Ponadto proszę uzasadnić dlaczego dla stali konstrukcyjnych S235JR i S355J2 uzyskano wzrost wielkości ziarna po wyżarzaniu normalizującym?
5. Doktorantka podaje, że w wyniku wyżarzania normalizującego stali S235JR i S355J2 uzyskano pasmową strukturę, co udokumentowano na rys. 9.5 i 9.6. Wydaje się to mało prawdopodobne i nasuwa się pytanie czy struktury na rys. nie zostały zamienione (szczególnie na rys. 9.5). Celem wyżarzania normalizującego jest uzyskanie drobnego i jednorodnego pod względem wielkości ziarna. Jeśli po tym zabiegu uzyskano pasmową strukturę to świadczy to o nieprawidłowo przeprowadzonej obróbce cieplnej.
6. Autorka przy opisie mikrostruktury stali AISI 304 i AISI 321 (odpowiednio str. 48 i 49) podaje, że zidentyfikowano *drobnoziarnistą strukturę austenityczną z wąskimi pasmami ferrytu δ* . Stąd też kieruje zapytanie, czy poprawnym jest posługiwanie się w dalszej części pracy opisami: „*stale austenityczne jednofazowe*” lub „*stale jednofazowe (austenityczne)*”?
7. Analiza przebiegu szybkości erozji stali S235JR-WD wykazała zupełnie inny przebieg krzywej niż dla stali S355J2-WD. Czym uzasadni Pani inny przebieg zmian szybkości dla gatunków stali mając na uwadze podobne: składy chemiczne, budowę mikrostrukturalną i średnią twardość.
8. Autorka na str. 89 przytacza, że w dostępnej literaturze często opisywana jest bezpośrednia zależność między twardością powierzchni a ubytkami masy. W dyskusji Autorka dla stali nierdzewnych potwierdza powyższą zależność, natomiast dla stali konstrukcyjnych stwierdza, że nie wykazano takiej zależności. W tym miejscu również, kieruje pytanie do Doktorantki, czym uzasadni dla stali S355J2-WD (o korzystniejszych parametrach wytrzymałościowych)

- aż niemal 3-krotnie większy ubytek masy w porównaniu do stali S235JR przy podobnych średnich wartościach twardości?
9. W pracy podano, że oszacowane w warunkach laboratoryjnych wartości ubytków masy mieszczą się w zakresie błędu względnego ok. 30%. Czy w warunkach rzeczywistych można spodziewać się większych czy mniejszych wartości ubytków oraz czy odnośnie wniosku 8 dotyczącym w/w zakresów jest to (30%) dużo czy mało?
10. Pomimo starannego opracowania graficznego związanego z prezentacją wyników chropowatości oraz analizy SEM mechanizmów zużycia, w mojej ocenie zabrakło zdjęć makroskopowych próbek po testach kawitacyjnych lub fotografii z przekrojów poprzecznych powierzchni po procesach kawitacyjnych, co jeszcze bardziej uatrakcyjniłoby analizę stanu warstwy wierzchniej.
11. Parametr Rq jest statystycznie równy odchyleniu standardowemu rzędnych profilu, a jednorazowa duża wysokość i wcięcie profilu wpływają na jego wartość bardziej niż wartość Ra . Czy mając na uwadze powyższe można spodziewać się lepszego dopasowania w autorskim wzorze umożliwiającym oszacowanie przybliżonych ubytków masy, proszę o komentarz.

W tym miejscu chciałbym zaznaczyć, że powyższe pytania oraz uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej, a praca dotyczy zagadnień związanych z dyscypliną - *inżynieria mechaniczna*.

4. Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Pani mgr inż. Dominika Zakrzewska w przedłożonej rozprawie doktorskiej zrealizowała obszerny i ciekawy program badawczy. Uzyskane wyniki są **oryginalne i zawierają elementy nowości**. Doktorantka wykazała się dużą dojrzałością naukową, samodzielnością w planowaniu i realizacji badań, poprawną analizą i interpretacją ich wyników zmierzającą do rozwiązania problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy. Powyższe cechy pozwoliły na osiągnięcie postawionego celu, sformułowanie wniosków, a w konsekwencji przygotowanie wartościowej rozprawy na bardzo dobrym poziomie merytorycznym.

W mojej ocenie praca zasługuje na wyróżnienie, o co niniejszym wnoszę.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska
Pani mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej
pt.: „*Wpływ obciążenia kawitacyjnego na proces niszczenia wybranych materiałów*”

spełnia w pełni 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. z 2017 r. poz. 1789), rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. z 2018 r. poz. 261), oraz w ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 ze zm.). W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

Mariusz Holczer