



Lublin, dn. 2022-06-17

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Marty Buszko pt.:

**„Wpływ intensywności obciążeń erozyjnych wywołanych cząstkami stałymi w środowisku wodnym  
na proces niszczenia wybranych stali konstrukcyjnych”**

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. Marcina Lackowskiego, prof. IMP PAN z dnia 14 kwietnia 2022 r.

### **1. Charakterystyka i ocena formalna rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Marty Buszko przedstawiona została w postaci zwartego opracowania na 160 stronach formatu A4. Struktura opracowania nie odbiega od przyjętych standardów dla tego typu prac i została logicznie podzielona na 7 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 (jeden rozdział), tezy, cele i zakres pracy, metodykę badań, wyniki badań, dyskusję wyników badań, wnioski oraz literaturę. Wstęp zawiera informację wprowadzającą do złożonej problematyki jakim jest erozja cząstkami stałymi. W rozdziale drugim dokonano przeglądu danych literaturowych związanych z problematyką rozprawy, gdzie scharakteryzowano stanowiska stosowane do badania zużycia erozyjnego, opisano czynniki mające determinujący wpływ na to zjawisko, omówiono mechanizmy i matematyczne modele erozyjne oraz opisano próby zwiększenia odporności materiałów na powyższe procesy w wyniku obróbki cieplnej. Szkoda, że w tym miejscu zabrakło podsumowania studium literaturowego i pewnych konkluzji z tego przeglądu. Ten brak nieco rekompensuje bardzo starannie opracowana dyskusja wyników badań, w której Autorka odnosi się szeroko do analizowanej w części przeglądowej literatury. Na stronie 56 przedstawiono

tezy, cel i zakres pracy. Cel pracy postawiony jest jasno i w miarę poprawnie. Również przyjęte 3 tezy sformułowane są poprawnie, a przyjęty zakres pracy umożliwia osiągnięcie postawionego celu. Kolejne rozdziały 4 i 5 poświęcone są opisowi badanych gatunków stali, metodyce badawczej oraz prezentacji wyników badań dla każdej stali z osobna we właściwych podrozdziałach. Rozdział 6 to rzetelnie i starannie przeprowadzona dyskusja wyników badań obszernie zrealizowana na 26 stronach. Część praktyczna pracy zakończona jest sformułowaniem 15 wniosków wynikających z przeprowadzonych prac badawczych.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 270 pozycji (w tym dwie pozycje 20 i 21 zdublowane w miejscu poz. 234 i 235), co wskazuje na wnikliwie przeprowadzoną analizę stanu wiedzy w obszarze tematu rozprawy. Głównie jest to literatura zagraniczna o zasięgu międzynarodowym, w tym 6 pozycji współautorskich Doktorantki.

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 intensywności obciążeń erozyjnych wywołanych cząstkami stałymi w środowisku wodnym na proces niszczenia wybranych stali konstrukcyjnych*” w pełni koresponduje z treścią zawartą w pracy.

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

- str. 4 „HM - twardość w skali Mohra” powinno być ...w skali Mohsa”
- str. 38 zamiennie stosowanie fraz określających rodzaj struktury gatunku stali AISI tj. „...*stal AISI 1018 (1.0401) o strukturze perlityczno-ferrytycznej*” dalej w tekście mamy „...*na stali ferrytyczno-perlitycznej AISI 1018...*”
- str. 52 „...*w mikrostrukturze ledeburytowej stali...*” powinno być „...*w mikrostrukturze ledeburytycznej stali...*”
- str. 53 „*ledeburytowa stal*” powinno być ledeburytyczna stal
- str. 54 zapis „...*HV<sub>0,981N</sub>*” niezgodny z wytycznymi normy PN-EN ISO 6507-1 odnośnie podawania wyników pomiaru twardości w skali Vickersa
- w części praktycznej pracy Autorka zamiennie stosuje określenie „*mikrotwardość*” i „*twardość*” dla tych samych obciążeń pomiarowych
- str. 61 „...*przy obciążeniu 500 gf...*” i później w dalszej części pracy „*300 gf*”, przy podawaniu obciążenia powinno się stosować jednostki z układu SI, z kolei gram-siła (gf) jest grawitacyjną metryczną jednostką siły
- brak konsekwencji w podawaniu oznaczeń gatunków stali, wybrane gatunki oznaczane są wg normy PN-EN inne wg normy AISI lub SAE. Skoro praca realizowana jest w j. polskim to należy



używać oznaczeń stali zgodnie z normą PN-EN w *systemie znaków*. Autorka wprowadzie w nawiasach podaje wspólnie dla wszystkich gatunków stali oznaczenia w *systemie cyfrowym*, który nie jest stosowany w pracach naukowych a katalogach handlowych.

- str. 144 „*przeprowadzono walidację paru modeli*” powinno być „*przeprowadzono walidację kilku (bądź wybranych) modeli*”

- str. 66 tab. 4.9 jako skalę twardości podano *HRBW* powinno być HRB lub HBW

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 stanowi poważny problem eksploatacyjny, którego mechanizm nie jest jeszcze na tyle dokładnie poznany, aby można go opisać niezawodnym modelem matematycznym i swobodnie wykorzystać w praktyce inżynierskiej. Tematykę badań uważam za aktualną i istotną nie tylko z naukowego punktu widzenia ale również utylitarnego, gdzie uzyskane wyniki badań wpływu intensywności obciążeń erozyjnych mogą stanowić cenną informację dla konstruktorów i technologów przy doborze materiałów, projektowaniu maszyn i instalacji pracujących w środowiskach wodnych. Autorka zwraca uwagę na złożoność procesu niszczenia powierzchni materiałów cząstkami stałymi w środowisku wodnym. Na wskutek wnikliwie przeprowadzonej analizy literatury uwidacznia się brak jednoznaczności danych literaturowych dotyczących wpływu parametrów mogących wpływać na szybkość erozji, a w niektórych przypadkach oceny np. wpływu mikrostruktury czy obróbki cieplnej na erozję uczeni są wręcz podzieleni. Stąd wynikała m.in. potrzeba badań podjętych w powyższym obszarze. Dlatego też wybór tematyki pracy jest w pełni uzasadniony, a sformułowanie tematu rozprawy poprawne.

Na podstawie analizy stanu wiedzy Autorka sformułowała cel pracy:

„*Celem pracy jest analiza wpływu intensywności obciążeń erozyjnych na stale konstrukcyjne (jednofazowe i dwufazowe).*”

oraz przyjęła 3 tezy:

„*1. Intensywność obciążeń (prędkość obrotowa i kąt uderzenia) wpływa na proces niszczenia cząstkami stałymi w środowisku wodnym.*

*2. Własności mechaniczne determinują proces niszczenia erozyjnego.*

*3. Intensywność obciążeń i własności mechaniczne wpływają na proces erozji warstwy wierzchniej (zmiany parametrów chropowatości powierzchni).*”

Przedstawione przez Doktorantkę cel i tezy uważam za właściwe, sformułowane jasno i klarownie.

Przedmiot badań stanowiły dwie (dwufazowe) niestopowe stale konstrukcyjne gat. S235JR i S335J2 oraz (jednofazowe) dwa gat. stali odpornych na korozję X5CrNi18-10 i X10CrAlSi18. Stąd też w tym miejscu muszę skierować pytanie, które zamieszczono również w pkt. 3 recenzji: *Jak ma się zdefiniowany cel pracy do klasyfikacji stali wg jakości, własności i zastosowania wg normy PN-EN 10020:2003?*

Doktorantka właściwie zaplanowała i zrealizowała program badań. Dla osiągnięcia celu i udowodnienia tezy wykorzystwała szerokie spektrum metod badawczych obejmujących m. in. obróbkę cieplną, mikroskopową analizę metalograficzną oraz SEM połączone z analizą składu chemicznego EDS, stanowiskowe badania erozyjne, pomiary twardości metodą Vickersa i pomiary profilometryczne. Metodologia badań i zrealizowany program jest dobrze opisany i świadczy o szerokiej wiedzy o bardzo dobrym przygotowaniu Autorki w obszarze współczesnych metod pomiarowych i planowania eksperymentu. Chociaż pewien niedosyt stanowi fakt, że w pracy zabrakło metodyki pomiaru wielkości ziaren.

Wykonane obszerne i kompleksowe badania powierzchni po testach erozyjnych poparte są dużą ilością graficznych zestawień parametrów mających determinujący wpływ na powyższe procesy i stanowią bardzo silną stronę tego opracowania na podstawie, których Autorka dokonała wnikliwej analizy procesów zniszczenia oraz określenia mechanizmów umocnienia. Stopień uszkodzenia powierzchni po testach erozyjnych został udokumentowanych licznymi dobrej jakości zdjęciami SEM co dodatkowo podwyższa walory edycyjne recenzowanej pracy.

Całość pracy dopełnia 15 wniosków z przeprowadzonych badań, które dobrze się komponują z postawionymi tezami i celem pracy. Przy czym wniosek 11 jest w zasadzie powtórzeniem wniosku 9 i 10.

#### **Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej należą:**

1. Informacje dotyczące pomiarów chropowatości podawane po każdej ekspozycji dla stali ferrytycznych oraz ferrytyczno-perlitycznych dla badań na stanowiskach z zastosowaniem zbiornika zawieszinowego. Pod tym względem literatura jest uboga, a odnalezione informacje dotyczą głównie artykułów, które powstały na podstawie badań Autorki rozprawy oraz Promotora. Doktorantka odnajduje więc lukę, dotyczącą braku informacji na temat zmiany intensywności oddziaływania obciążeń erozyjnych na strukturę geometryczną powierzchni po każdej ekspozycji dla stali o w/w strukturze.
2. W przypadku stali austenitycznych wykazanie wpływu (tj. korelacji) względnej zmiany mikrotwardości  $\Delta H$  na szybkość erozji. W danych literaturowych można znaleźć głównie informacje opisujące zdolność materiału do umacniania się, co należy uznać za dość unikatowe i stanowiące wartość dodaną wynikającą ze zrealizowanych badań.



3. Bardzo szeroki i komplementarny zakres badań związanych z oceną czynników i właściwości mających wpływ na odporność erozyjną badanych gatunków stali. Zwłaszcza rozszerzenie tego zakresu o ocenę popularnych matematycznych modeli erozyjnych, co jest zauważalnym uzupełnieniem aktualnego stanu wiedzy i wskazaniem ze strony Autorki na konieczność jednak opracowania nowego modelu z uwzględnieniem nowych współczynników empirycznych. Ten kierunek badań może być z powodzeniem rozwijany w dalszych pracach Autorki i zespołu pod kierunkiem Promotora rozprawy.

### 3. Uwagi, wątpliwości i zapytania

Zawartość merytoryczną rozprawy oceniam pozytywnie, jednak podczas zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęły mi się pewne pytania i uwagi. Proszę o ustosunkowanie się do wyszczególnionych poniżej:

1. str. 56 podano „*Celem pracy jest analiza wpływu intensywności obciążeń erozyjnych na stale konstrukcyjne (jednofazowe i dwufazowe).*” Przedmiotem badań są (dwufazowe) niestopowe stale konstrukcyjne gat. S235JR i S335J2 oraz (jednofazowe) dwa gat. stali odpornych na korozję X5CrNi18-10 i X10CrAlSi18. Stąd też pytanie, - jak ma się zdefiniowany cel pracy do klasyfikacji stali wg jakości, własności i zastosowania wg normy PN-EN 10020:2003?
2. str. 57. Zakres badań pracy obejmował m. in. „*pomiary zmian wartości mikrotwardości*”. W tym miejscu proszę o uzupełnienie wyjaśnienia dlaczego wybrane pomiary twardości zostały przeprowadzone przy obciążeniu 300 g (HV0,3) i 500 g (HV0,5). Według Autorki to jeszcze mikrotwardość a prawidłowo już powinna być to twardość?
3. str. 59. Pytanie dlaczego dla stali X10CrAlSi18 badania erozyjne wykonano przy kącie uderzenia 90° stopni a pominięto kąt uderzenia 30° – wówczas uzyskano by kompleksową charakterystykę badanych pod tym względem stali.
4. Jako ścierniwo do testów erozyjnych wybrano staliwo o kształcie kulistym kierując się tym, że badania miały charakter modelowy i poznawczy oraz ważne było zapewnienie powtarzalnych warunków eksperymentu. Stąd też pytanie, czy po każdej ekspozycji wymieniano śrut stalowy oraz czy czynnik korozyjny związany z podatnością na korozję staliwa mógł wpływać na stopień zużycia badanych powierzchni stalowych próbek?
5. 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, szczególnie w nawiązaniu do pytania 11 (pomiar rozmiaru ziaren austenitu po przesycaniu). Proszę podać metodykę pomiaru wielkości ziaren.

6. str. 61 proszę uzasadnić wybór temp. 1000°C w przeprowadzonej obróbce wyżarzania stali X10CrAlSi18. W tej temperaturze dochodzi do niepożądanego rozrostu ziarna. Wprawdzie jest to stal żaroodporna, ale max temp. pracy w atmosferze powietrza wynosi właśnie 1000°C. Stąd też pytanie, jak się ma to do warunków środowiska w jakim przeprowadzane były testy zużycia erozyjnego.
7. W całej pracy brak danych dotyczących czasów realizowanych obróbek cieplnych. Proszę o podanie powyższych informacji.
8. Brak w pracy metodyki odnośnie identyfikacji i pomiarów wielkości węglików dla stali X10CrAlSi18. Wprawdzie na str. 63 rys. 4.4 oraz tab.4.3 prezentowane są widmo oraz skład chemiczny. Niemniej jednak wyniki powyższych analiz nie dają pewności czy rzeczywiście mierzono węgliki chromu, gdyż dla tej stali w zakresie temp. 550-900°C występować mogą również międzymetaliczne wydzielienia faz FeCr. W ocenie recenzenta znacznie lepsze efekty identyfikacji można uzyskać podczas analizy fazowej XRD. Ponadto jak ma się dokładność podawania wyników analizy EDS w tab. 4.3 dla wybranych pierwiastków do 4 miejsc po przecinku, szczególnie gdy brak jest podanej wielkości błędu.
9. str. 64 Autorka podaje, że w wyniku wyżarzania normalizującego stali S235JR uzyskano pasmową strukturę, co udokumentowano na rys. 4.5. Wydaje się to mało prawdopodobne i nasuwa się pytanie czy struktury rys. 4.5a i rys. 4.5b nie zostały zamienione. 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. Ponadto poniżej Doktorantka tłumaczy powyższe zjawisko międzydendrytycznymi mikrosegregacjami pierwiastków stopowych. W ocenie recenzenta nie widać żadnych dendrytów, czy mamy tu do czynienia z odlewem i tu proszę o wyjaśnienie.
10. str. 65 i 66 Autorka podaje, że dla stali S355J2 również po wyżarzaniu normalizującym uzyskano pasmowa strukturę udokumentowaną na rys. 4.6 jak w przypadku gatunku S235JR. Co świadczy, że zabieg obróbki cieplnej również dla tej stali wykonano nieprawidłowo. Proszę tu Doktorantkę o wyjaśnienia, także w kontekście niejasności wysuwanych do pytania powyżej nr 9.
11. str. 66 i 67 dla stali AISI 304 wykonano zabieg przesycania w temp. 1050°C i takie próbki bez innych dodatkowych zabiegów (np. zgniotu) poddano procedurze badań eksperymentalnych. Jaki był cel badania próbek w takim stanie oraz o podanie przykładów zastosowania stali AISI 304 jedynie po przesycaniu? Ponadto w nawiązaniu do powyższej obróbki proszę o wyjaśnienie dlaczego po przesycaniu tej stali uzyskano spadek rozmiaru ziarna i wzrost twardości, co wydaje się niezgodne z ogólnie dostępną wiedzą dla stali austenitycznych, dla których po przesycaniu następuje rozrost ziarna i spadek twardości.



12. str. 70. Pomiary twardości realizowano na odcinkach wynoszących 2035  $\mu\text{m}$  od zerodowanej powierzchni. Stąd też pytanie czy zmiany twardości mogły aż tak głęboko sięgać? To blisko połowa grubości próbek.
13. str. 128 rys.6.8 jaki jest sens podawania współczynnika  $R^2=1$ , skoro dla dwóch punktów na wykresie zawsze uzyskujemy idealny związek liniowy.
14. str. 147 Autorka we wniosku nr 5 podaje: „Dla materiałów w stanie dostawy uzyskano wyższe wartości wykładnika  $b$  w porównaniu do stali po obróbce cieplnej.” Proszę wyjaśnić dlaczego tak się dzieje.
15. str. 148. We wniosku 13 m. in. Autorka stwierdza „*Ferryt jako faza o niższej twardości niż perlit uległ silnemu odkształceniu plastycznemu podczas niszczenia erozyjnego. Z kolei perlit w miękkiej osnowie ferrytu był narażony na wykruszanie (kruche pękanie) w wyniku cyklicznych uderzeń cząstek stałych o erodowaną powierzchnię.*” Powyższy wniosek bezpośrednio w części praktycznej pracy nie był wykazany. Taki wniosek można byłoby wykazać na np. przekrojach poprzecznych zerodowanych próbek stali poddanych trawieniu.
16. W pracy badaniu została poddana m.in. stal żaroodporna ferrytyczna X10CrAlSi18, która charakteryzuje się występowaniem w strukturze ferrytu stopowego. Stąd też pytanie do Doktorantki czy uzyskane wyniki badań będą podobne dla stali o strukturze typowo ferrytycznej (ferryt niestopowy)?
17. W pracy brakuje wyjaśnienia mechanizmów umocnienia jakie zachodzą w warstwie wierzchniej badanych stali, a jednocześnie, które są charakterystyczne dla stali austenitycznych oraz stali ferrytycznych. Czy dla stali ferrytycznych i austenitycznych proces umocnienia warstwy wierzchniej przebiega tak samo?
18. Autorka podczas analizy SEM powierzchni po testach erozyjnych nieco pomija mechanizm zużycia zmęczeniowego na co mogłyby wskazywać np. fotografie rys. 5.12b, rys. 5.30f. W ocenie recenzenta widoczny równolegle obok mechanizmu zużycia ściernego i powstających deformacji plastycznych jest również mechanizm niszczenia zmęczeniowego. Wprawdzie Doktorantka w tekście wspomina o „*cyklicznych uderzeniach*” śrutu staliwnego oraz o „*wyluszczeniach wskutek cyklicznego niszczenia materiału*”, ale bezpośrednio tego mechanizmu nie wskazuje. Stąd też pytanie do Doktorantki o wyjaśnienie powyższej kwestii oceny uszkodzenia powierzchni.

W tym miejscu chciałbym zaznaczyć, że powyższe pytania oraz uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Marty Buszko. Praca dotyczy zagadnień związanych z inżynierią powierzchni, które bardzo dobrze wpisują się w dyscyplinę inżynieria

mechaniczna, a przytoczone uwagi w dużej mierze dotyczą obszarów tematycznych z dyscypliny - inżynieria materiałowa.

#### 4. Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Pani mgr inż. Marta Buszko 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. Marty Buszko

pt.: „**Wpływ intensywności obciążeń erozyjnych wywołanych cząstkami stałymi w środowisku wodnym na proces niszczenia wybranych stali konstrukcyjnych**”

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. Nr 65, poz. 595).

W związku z tym wnoszę o przyjęcie rozprawy mgr inż. Marty Buszko i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

*Marek Holach*