

Prof. dr hab. inż. Andrzej Zieliński
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej pt.
„WPLYW OBCIĄŻENIA KAWITACYJNEGO NA PROCES NISZCZENIA
WYBRANYCH MATERIAŁÓW”**

1. Dane ogólne

Rozprawa została opublikowana w lutym 2023 r. w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku i jest przedmiotem w przewodzie doktorskim mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej, wykonywanym pod opieką naukową dr hab. inż. Alicji Krelli, prof. IMPA PAN, prowadzonym przez Radę Naukową IMP PAN.

Rozprawa liczy 128 stron. Składa się z dwunastu rozdziałów, wniosków i bibliografii.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Wprowadzenie stanowi pierwszy rozdział rozprawy. Zgodnie z nim rozprawa to poszerzenie wiedzy na temat erozji kawitacyjnej stali ferrytyczno-perlitycznych oraz stali austenitycznych, zaś prezentowana w dysertacji formuła matematyczna umożliwiająca oszacowanie wielkości ubytków masy na podstawie wartości chropowatości określonych z zastosowaniem siatki pomiarów chropowatości powierzchni wskazuje na istotność analizy własności powierzchniowych stali.

W rozdziale drugim opisuje doktorantka zjawisko kawitacji przytaczając jego charakterystykę, występowanie, intensywność określaną za pomocą liczby kawitacyjnej, formy kawitacji. Opis jest zwięzły, ale wyczerpujący.

Erozja kawitacyjna jest z kolei następną, trzecią częścią rozprawy opartą na poszukiwaniach literaturowych. Autorka rozprawy przytacza definicję erozji kawitacyjnej, opisuje krzywą kawitacyjną, jak też zwraca uwagę zarówno na niepożądane skutki erozji kawitacyjnej, jak i na pozytywne wykorzystanie kawitacji w przemyśle.

Wpływ własności mechanicznych na erozję kawitacyjną omawiany jest w rozdziale czwartym. W pierwszej części doktorantka prezentuje wyniki badań twardości zaczerpnięte z literatury podkreślając istnienie korelacji między twardością i znormalizowaną odpornością kawitacyjną, jak też średnią głębokością uszkodzeń erozyjnych. Przedstawia doktorantka krótko techniki podwyższania twardości przez obróbkę cieplną, cieplno-chemiczną i nakładanie powłok. W kolejnym podrozdziale autorka dokonuje analizy zależności między odpornością na erozję kawitacyjną i całkowitą energią odkształcenia. W kolejnej, trzeciej części tego rozdziału doktorantka skupia się na zależnościach erozji kawitacyjnej od trzech podstawowych wskaźników mechanicznych, tj. wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności i wydłużenia procentowego po zerwaniu, stwierdzając wzrost odporności kawitacyjnej ze wzrostem właściwości wytrzymałościowych dla wielu materiałów, jednakże brak istotnej zmiany lub niekiedy spadek odporności wraz ze spadkiem plastyczności wyrażonej przez wydłużenie względne. W części ostatniej tego rozdziału doktorantka skupiła się na wytrzymałości zmęczeniowej podkreślając jej znaczenie dla formy zniszczenia, ale także omawiając ciekawą próbę modelowania tej zależności przy zastosowaniu dwóch złożonych parametrów, modułu wzmacniającego odkształcenie i obciążenia uderowego.

Kolejny rozdział rozprawy stanowi omówienie zależności chropowatości powierzchni i odporności kawitacyjnej. Autorka zwraca uwagę na istotne znaczenie chropowatości początkowej dla procesu kawitacji, dobrą korelację między chropowatością erodowanej powierzchni stali oraz głębokością i rozmiarem obserwowanych kraterów, silną zależność między chropowatością po teście erozyjnym i masową szybkością erozji. Trzy stadia wzrostu chropowatości w procesie erozji powierzchni, tj. inkubacja, przyspieszenie i maksymalna prędkość, odpowiadają ubytkom masy w czasie zgodnie z normą ASTM G32.

Obszerny szósty rozdział poświęcony został literaturze dotyczącej odporności na erozję kawitacyjną stali austenitycznych. Autorka stwierdza, że wysoka odporność tych stali wynika z przemiany austenitu w martenzyt pod wpływem cyklicznie zmiennych obciążeń. Jednakże to, w jakim stopniu zajdzie ta przemiana fazowa, zależy od intensywności kawitacji, temperatury, stanu naprężeń i odkształceń, jak też składu chemicznego stali. Trafnie doktorantka stwierdza, analizując pokaźną liczbę publikacji i zmiennych procesowych, iż trudno jednoznacznie określić przyczynę wysokiej odporności stali austenitycznych, która kształtowana jest przez wiele czynników, jak gatunek stali, wyjściowe własności mechaniczne, modyfikacja powierzchniowa stali, wreszcie warunki kawitacji.

Podobnie bogaty i potwierdzający analityczne umiejętności autorki jest rozdział omawiający odporność na erozję kawitacyjną stali dwufazowych. Píše w nim doktorantka, iż stale ferrytyczno-perlityczne cechuje niska odporność na kawitację, zwłaszcza przy wzrastającym udziale ferrytu, natomiast znacznie lepsze zachowanie wykazują stale dwufazowe austenityczno-ferrytyczne. Istnieje przy tym dla tych ostatnich korelacja między odpornością kawitacyjną i właściwościami wytrzymałościowymi. Rozdział prezentuje także nieliczne metody poprawy odporności stali dwufazowych na kawitację, takie jak śrutowanie laserowe, czy nawęglanie z hartowaniem.

Oceniam wysoko prezentację obecnego stanu wiedzy w obszarze problemu badawczego rozprawy. Część literaturowa oparta została na 148 pozycjach literaturowych, przy czym ponad połowa z nich została opublikowana w okresie ostatnich 15 lat. Podział prezentacji stanu wiedzy uznaję za trafny, zawarte informacje za ważne dla problemu badawczego pracy, sposób opisu za przejrzysty i właściwy dla opracowań naukowych. Część literaturowa w pełni uzasadnia proponowanie przez panią promotor i podjęcie przez doktorantkę badań w obszarze słabo, w mojej ocenie, rozpoznanym z powodu licznych zmiennych wpływających na proces erozji kawitacyjnej i złożonych zależności między nimi.

Teza, cele i zakres pracy zostały zdefiniowane w kolejnym rozdziale. Celem pracy według autorki była analiza wpływu intensywności obciążeń kawitacyjnych definiowanych za pomocą prędkości przepływu cieczy na odporność kawitacyjną wybranych stali. Miało to doprowadzić do określenia zależności między tą prędkością i odpornością na erozję kawitacyjną, a także między właściwościami mechanicznymi i chropowatością, a mechanizmem erozji powierzchni (obserwacje mikroskopowe). Doktorantka sformułowała trzy tezy: o wpływie intensywności obciążeń określonej przez prędkość przepływu cieczy na proces erozji kawitacyjnej stali; o wpływie własności mechanicznych na proces erozji kawitacyjnej stali; wreszcie o wpływie intensywności obciążeń kawitacyjnych i własności mechanicznych stali na proces oraz obszar erozji warstwy wierzchniej. W tym samym rozdziale autorka przedstawiła także zakres badań i elementy przyszłej dyskusji. Uznaję, że cele, twierdzenia do udowodnienia i zakres pracy zostały sformułowane w wystarczającym stopniu adekwatnie do analizy stanu wiedzy na temat problemu badawczego. Miałbym tu drobne jedynie uwagi, nie wymagające dyskusji: przedstawione tezy uznaję raczej za hipotezy, czyli twierdzenia wymagające stwierdzenia ich prawdziwości lub fałszywości; celem pracy może być ocena, czy charakterystyka zależności, bądź istotności wpływu, ale nie analiza, ponieważ jest to jedna z technik w metodologii badań naukowych; tak sformułowane tezy mają dość ogólny charakter i pomijają istotny element wykonanych badań, jakim była analiza zachowania się różnych stali, o różnej mikrostrukturze, kształtowanej przez skład i obróbkę cieplną; wreszcie widoczne jest częściowe powtórzenie tezy drugiej (wpływ własności mechanicznych na proces erozji) w tezie trzeciej (wpływ ...własności mechanicznych na proces ... erozji).

W rozdziale poświęconym metodyce badań autorka omawia stanowisko pomiarowe i parametry badawcze, przygotowanie próbek do badań kawitacyjnych, technikę badania ubytków masy, pomiary chropowatości powierzchni, analizę degradacji powierzchni, analizę rozkładu twardości w głębi, wreszcie charakteryzuje badane materiały. Zgodnie z opisem stanowiskiem pomiarowym był tunel kawitacyjny. Badania wykonano przy czterech wartościach ciśnienia na wlocie do komory kawitacyjnej, którym odpowiadały odpowiednie wartości ciśnienia na wylocie komory kawitacyjnej, natężenia przepływu, prędkości przepływu i liczby kawitacyjne. Próbkę do badań polerowano, ważono, mierzono ich chropowatość i twardość. W trakcie badań kawitacyjnych ważono próbki po jedenastu określonych czasach ekspozycji, od 10 do 600 min. Chropowatość mierzono po 240, 480 i 600 min z wykorzystaniem specjalnie opracowanej wcześniej siatki pomiarowej. Charakterystykę degradacji powierzchni uzyskano z zastosowaniem mikroskopii elektronowej skaningowej. Pomiar twardości dokonywany był na powierzchni oraz na przekrojach poprzecznych, od głębokości 50 μm do aż 4050 μm . Jako materiałów do badań użyto austenitycznych stali nierdzewnych AISI 304 (1.4301) i AISI 321 (1.4541) oraz ferrytyczno-perlitycznych stali niskowęglowych S235JR (1.0037) i S355J2 (1.0577), w stanie dostawy oraz po przesycaniu (stale austenityczne) i wyżarzaniu normalizującym (stale ferrytyczno-perlityczne). Obserwacje mikrostruktur, dogłębnie omówione w tym rozdziale wraz z podaniem składów chemicznych i własności mechanicznych wg norm europejskich i kart materiałowych, prowadzono techniką mikroskopii optycznej na wytrawionych powierzchniach.

Wyniki badań zawarte są w rozdziale 10. Pierwsza ich część obejmuje badania ubytków masy i szybkości erozji poszczególnych stali. Dla obu stali ferrytyczno-perlitycznych obserwowano wzrost ubytków masy wraz ze wzrostem prędkości przepływu, brak czasu inkubacji, maksymalną szybkość erozji po 10 min, dość złożoną zależność szybkości erozji od natężenia przepływu, wyraźny wpływ obróbki cieplnej na obserwowane zależności. Dla stali austenitycznych odnotowano znacznie niższe ubytki masy w porównaniu do stali dwufazowych, czas inkubacji jedynie dla dużych prędkości przepływu, spadek szybkości erozji między 10 i 30 minutą testu. Następny podrozdział omawia wyniki badań chropowatości powierzchni pokazując, że obszar zwiększonej chropowatości odpowiada obszarowi zwiększonej erozji materiału, zaś maksymalna wartość parametru $Ra(\text{max})$ najlepiej odwzorowuje erozję po 600 min badań kawitacyjnych. Obserwowano wzrost powierzchni obszaru erozji wraz ze wzrostem prędkości przepływu cieczy oraz czasem ekspozycji. W kolejnej części rozdziału 10 prezentowane są wyniki obserwacji mikroskopowych po degradacji ujawniające zniszczenie erozyjne w formie licznych mikropęknięć oraz wżerów i kraterów, a dla stali austenitycznych także zmęczeniowy charakter zniszczeń. Dalej autorka omawia pomiary twardości w głębi wskazujące na spadek twardości z odległością od powierzchni, jednakże kształty krzywych twardość – odległość od powierzchni i ich monotoniczność zależały od rodzaju stali, obróbki cieplnej i natężenia przepływu. Najwyższe twardości obserwowano dla stref wykazujących najwyższą degradację powierzchni oraz chropowatość. Podkreślić trzeba ogromną liczbę wyników badań, ich staranne opracowanie, bardzo dobre udokumentowanie i wreszcie wyczerpujące omówienie. Jak na rozprawę doktorską, taka liczba wyników jest imponująca. Dodam jeszcze, że w rozdziale tym zawarto aż 56 rysunków.

Kolejny 11 rozdział poświęcono dyskusji wyników badań, jest to więc zasadniczy fragment rozprawy pozwalający na naukowe wyjaśnienia dotyczące roli poszczególnych determinant procesowych, a więc zmiennych niezależnych i zależnych, w przebiegu zjawiska erozji kawitacyjnej, charakterystykę przebiegu procesów erozji w zależności od zmiennych wejściowych, czyli mikrostruktury stali i natężenia przepływu, wreszcie na próbę matematycznego opisu obserwowanych zależności. To kluczowa część rozprawy, stąd i wnikliwa jej ocena w recenzji.

W dyskusji autorka dokonuje syntezy swoich dokonań i naukowego wyjaśnienia obserwowanych efektów. Stwierdza, że słuszna była jej hipoteza, iż wzrost prędkości przepływu powoduje wzrost ubytku masy oraz szybkości erozji badanych materiałów niezależnie od mikrostruktury, własności

mechanicznych, czy rodzaju dalszych modyfikacji stali (obróbka cieplna). Twierdzi ona, że dla danego przedziału prędkości przepływu istnieje liniowa zależność między wzrostem prędkości przepływu i szybkością erozji. Badania kavitacyjne wykazały znacznie wyższą odporność na erozję kawitacyjną stali austenitycznych w porównaniu do stali ferrytyczno-perlitycznych, przy czym dla tych ostatnich stali zauważyła doktorantka wyższe wartości ubytków masy w stanie po obróbce cieplnej niż w stanie dostawy. Wyższa odporność stali austenitycznych związana jest jej zdaniem z ich zdolnością do umacniania się, na co wskazują pomiary twardości w głębi erodowanego materiału, co jest poprawnym rozumowaniem.

Badania związku między twardością powierzchni i powstałymi w wyniku kawitacji ubytkami masy potwierdzają istnienie takiej korelacji, choć dla każdej stali rozważanej indywidualnie zależność ta ma inną postać. Autorka rozprawy zakłada, że to wielkość ziaren determinuje odporność erozyjną w przypadku stali austenitycznych.

Dla wszystkich materiałów w stanie dostawy wskazuje doktorantka, że szybkość erozji maleje wykładniczo wraz ze wzrostem plastyczności określanej wartością wydłużenia względnego w próbie rozciągania, dla każdej z prędkości przepływu cieczy. Przechodząc do właściwości wytrzymałościowych, przy wzroście granicy plastyczności liniowo wzrasta szybkość erozji.

Doktorantka obserwowała zależności między stosunkiem Re/R_m i parametrem R_a chropowatości powierzchni. Stale austenityczne wykazały znacznie niższy stosunek Re/R_m do parametru $R_a(\max)$ niż stale ferrytyczno-perlityczne, co koreluje nie tylko z wyższą odpornością na erozję kawitacyjną, ale też z parametrem chropowatości powierzchni, znacznie wyższym dla stali dwufazowych. Ponadto w przypadku stali jednofazowych wyższy stosunek Re/R_m wiąże się ze spadkiem $R_a(\max)$, natomiast dla stali dwufazowych zależy to od prędkości przepływu. Warto dodać, że pomiary chropowatości powierzchni erodowanej w wyniku kawitacji wykonano przy pomocy oryginalnej metody za pomocą siatki pomiarowej. Zaobserwowano wzrost obszaru erozji wraz ze zwiększającą się prędkością przepływu cieczy, ale analiza maksymalnych wartości chropowatości powierzchni ($R_{\max}$) wykazała ich przyrost do prędkości $v=2,49$ m/s, a następnie spadek. Doktorantka wyjaśnia tę obserwację i pojawienie się wartości szczytowej wzrostem chropowatości do pewnej wartości progowej, a dalszy jej spadek wynika z nakładających się na siebie uszkodzeń.

Doktorantka zaproponowała matematyczny opis logarytmicznej względnej zmiany twardości w funkcji $R_{\max}$ dla wszystkich stali austenitycznych. Uzyskana zależność wskazuje na to, że im wyższa chropowatość powierzchni, tym wyższa względna zmiana twardości materiału. Ponadto wysoka twardość może powodować wyższą odporność na erozję, ale zbyt wysoka twardość prowadzi do kruchości materiału i jego większej degradacji. Obserwuje się, że im wyższa jest końcowa szybkość erozji, tym niższa twardość powierzchni erodowanej.

Biorąc pod uwagę wyznaczone zależności między chropowatością powierzchni i pozostałymi zmiennymi, wartości R_a wykorzystano do opracowania fenomenologicznego wzoru umożliwiającego oszacowanie przybliżonych ubytków mas. Wykorzystując opracowany wzór, obliczono ubytki masy na podstawie pomiarów chropowatości powierzchni sporządzając modelowe krzywe erozyjne. Dopasowanie oszacowanych wartości uzyskanych z zaproponowanego wzoru dla stali austenitycznych w porównaniu do stali ferrytyczno-perlitycznych wskazuje na możliwość opracowania modelu, który nie będzie zawężał się do struktury, bądź liczby faz w stali. Autorka rozprawy udowadnia, iż proponowana przez nią formuła pozwala na dość dokładne przewidywanie ubytków masy i szybkości erozji, gdyż różnica między wartościami obliczanymi i rzeczywistymi wynosi ok. 30%. To dobry punkt wyjścia do prac badawczych uwzględniających większą liczbę zmiennych procesowych, jak i do wzrostu wiarygodności modelu.

Omówienie tego rozdziału jest w recenzji bardzo obszerne, a i tak jedynie skrótowo byłem w stanie przedstawić najbardziej zasługujące na uznanie wyniki analiz. Podsumowując uważam, iż dyskusja wyników przeprowadzona została bardzo wnikliwie i na wysokim poziomie naukowym, zaś znalezione

istotne korelacje między różnymi zmiennymi oraz zaproponowany wzór fenomenologiczny stanowią cenny i nowy wkład doktorantki w rozwój teorii erozji kawitacyjnej.

Rozdział 11 został poświęcony walidacji korelacji literaturowych. Biorąc pod uwagę znaczną liczbę korelacji, czy równań regresji, autorka stwierdza, iż tylko jeden model uwzględniający czynnik materiałowy uzyskał dopasowanie ponad 90% z wynikami jej badań, a to jedynie dla stali ferrytyczno-perlitycznych. Mimo to zgadzam się, że weryfikacja modeli wykazała słuszność opracowanej korelacji, raczej wzoru fenomenologicznego, a obecna formuła stanowi podstawę do dalszych analiz.

Rozdział 12 zawiera dziewięć wniosków, z którymi zgadzam się całkowicie. Między innymi, doktorantka stwierdza, iż wykonane testy kawitacyjne oraz analizy wyników pozwoliły na potwierdzenie tez postawionych w pracy. Wzrost obciążeń kawitacyjnych definiowanych przez prędkość przepływu cieczy prowadzi do wzrostu intensywności niszczenia stali. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu wzrasta powierzchnia obszaru erozji, choć brak korelacji między chropowatością i szybkością przepływu dla jej najwyższych wartości. Obserwuje się wyraźne różnice w degradacji powierzchni dla stali jedno- i dwufazowych, przy czym stal austenityczna silnie się umacnia w trakcie testu zwiększając odporność na erozję kawitacyjną w porównaniu do stali ferrytyczno-perlitycznych. Wzrost plastyczności powoduje spadek szybkości erozji. Granica plastyczności ma wpływ na odporność erozyjną, przy czym dla stali austenitycznych szybkość erozji maleje wraz ze wzrostem granicy plastyczności, natomiast w przypadku stali ferrytyczno-perlitycznych widoczna jest odwrotna korelacja. Niższa odporność stali dwufazowych tłumaczona jest wykruszaniem się ziaren perlitu w miękkiej osnowie ferrytu. Zaproponowana formuła matematyczna umożliwia wystarczająco dokładne oszacowanie ubytków masy badanych stali na podstawie pomiarów chropowatości. Walidacja korelacji literaturowych wykazała, że dotychczasowe modele odznaczają się ograniczoną stosowalnością.

Wysoko oceniam przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską uznając, że doktorantka prawidłowo określiła problem badawczy, wykonała dogłębną analizę obecnego stanu wiedzy, prawidłowo sformułowała tezy pracy i ułożyła plan badań, jak też zaproponowała właściwe materiały i aparaturę. Uzyskała one bardzo obszerne wyniki i dokonała ich dogłębnej i rzetelnej analizy, a także w dyskusji i we wnioskach zawarła wiele cennych spostrzeżeń.

Mimo bardzo dobrego postrzegania wykonanej pracy mam jednak kilka uwag merytorycznych, ograniczonych jedynie do najważniejszego rozdziału:

1. Str. 88: „Dla danego przedziału prędkości przepływu uzyskano zależność liniową.”. To twierdzenie wydaje się prawdziwe, patrząc na rysunek 11.1, jednakże jego prawdziwość wymagałaby podania i tutaj także współczynnika determinacji, jak to czyni doktorantka przy następnych wykresach.
2. Str. 89: „Znacznie wyższa odporność kawitacyjna stali austenitycznych wynika również z absorpcji energii pochodzącej z cyklicznych uderzeń mikrostrug w powierzchnię próbki [43], [56].” Proszę o wyjaśnienie, w jakiej formie absorbowana jest energia w materiale zapobiegając w ten sposób kawitacji stali, czy w formie energii cieplnej?.
3. Str. 90: „Mianowicie, dla wszystkich materiałów w stanie dostawy uzyskano, że szybkość erozji maleje wykładniczo wraz ze wzrostem wydłużenia procentowego ... Przy wzroście granicy plastyczności liniowo wzrasta szybkość erozji. ... nie tylko twardość może znacząco wpływać na odporność materiału na erozję kawitacyjną.”. Przyjmuje się, że na ogół istnieje korelacja między twardością, wytrzymałością na rozciąganie i granicą plastyczności. Tu jednak wzrost twardości zmniejsza szybkości erozji, zaś wzrost granicy plastyczności ją podwyższa. Proszę o wytłumaczenie tej sprzeczności.
4. Str. 90: „wysoka plastyczność materiału wymaga większej energii do zainicjowania pęknięć, ale odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej zachodzą łatwiej niż pęknięcie. Spadkowi plastyczności materiału towarzyszy wzrost kruchości materiału, który może przyczynić się do wzrostu szybkości erozji. W przypadku materiałów kruchych pęknięcia następują łatwiej niż

ich odkształcenie”. Widoczne są tu sprzeczności, proszę więc o wyjaśnienie, czy większa energia jest zdaniem doktorantki potrzebna do inicjowania pęknięć kruchych, czy odkształceń plastycznych? Czy w pierwszym zdaniu autorka ma na myśli plastyczność, czy granicę plastyczności? Wydaje się, że to tylko przejęzyczenie, ale proszę o odpowiednie przeredagowanie tej części dyskusji, jeżeli autorka zgadza się z moją uwagą.

5. Str. 91: Zaobserwowano trend wzrostu ubytków masy wraz z rosnącą wytrzymałością na rozciąganie dla stali ferrytyczno-perlitycznych oraz spadku ubytków masy wraz ze wzrostem wytrzymałości stali austenitycznych. Wyjaśnienie tego przeciwnego efektu jest niewątpliwie trudne, ale mam prośbę o pokuszenie się przez doktorantkę o wskazanie, jakie cechy strukturalne mające wpływ na wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałość zmęczeniową mogą być za to odpowiedzialne.
6. Str. 91: Doktorantka pisze, że istnieje ograniczona liczba pozycji literaturowych, w których rozpatruje się wpływ własności plastycznych stali na jej odporność kawitacyjną. Dalej jednak przytacza publikację, w której mowa o tym, że erozja kawitacyjna jest wynikiem zniszczenia odkształceniowo-zmęczeniowego, na który znaczący wpływ ma wartość granicy plastyczności oraz wytrzymałości zmęczeniowej. Rozumiem, że w pierwszym zdaniu autorka miała na myśli nie właściwości plastyczne, ale wytrzymałościowe wyrażone granicą plastyczności?

Ocena formalna pracy

Rozprawa cytuje 179 pozycji literaturowych, w tym około połowy stanowią publikacje wydane od 2010 do 2023 r. Zawiera dużą liczbę wykresów i fotografii. Jest napisana ładnym językiem, z dużym talentem, poprawna od strony technicznej, dobrze zredagowana i pięknie wydana. Błędy literowe są dość rzadkie, błędy interpunkcyjne także nieczęste. Stosowana terminologia jest całkowicie poprawna.

Wniosek końcowy

Oceniam nad wyraz pozytywnie przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej jako stanowiącą oryginalne rozwiązanie problemu naukowego erozji kawitacyjnej stali w aspekcie badań zależności między zmiennymi niezależnymi i zależnymi. W szczególności doceniam ogromną liczbę badań, znalezionych wiele trendów i opracowanych równań korelacji liniowej między zmiennymi zewnętrznymi i wewnętrznymi, przy szczególnym nacisku na skład fazowy stali i mikrostrukturę stali, chropowatość powierzchni, właściwości wytrzymałościowe i plastyczne. Biorąc pod uwagę wszystkie te przesłanki wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Ponadto biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy pracy, ogromną liczbę uzyskanych danych, sformułowanie wielu równań korelacyjnych, ale zwłaszcza zaproponowanie przez doktorantkę fenomenologicznej formuły matematycznej wiążącej chropowatość powierzchni z szybkością erozji i innymi zmiennymi, oryginalną w skali światowej i zweryfikowaną w oparciu o dane z literatury światowej, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominiki Zakrzewskiej.



Gdańsk, 24.04.2023 r.