

Poznań, 16-05-2018

dr hab. inż. Arkadiusz Stachowiak, prof. PP
Instytut Maszyn Roboczych
i Pojazdów Samochodowych
Politechniki Poznańskiej

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina KOWALSKIEGO

Tytuł rozprawy:

*„Polepszenie trwałości elementów ze stali konstrukcyjnej narażonych na zużycie
tribokorozyjne w środowisku morskim”*

Recenzja została przygotowana na podstawie pisma prof. dr hab. inż. Janusza Zielińskiego, Dziekana Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej Filia w Płocku (Umowa o dzieło nr 6936/PL01/2018/7193/00005 z dnia 09-05-2018).

1. Dane ogólne

Promotorem recenzowanej rozprawy jest dr hab. Ewa Kasprzycka, profesor Politechniki Warszawskiej, natomiast promotorem pomocniczym dr inż. Jacek Wernik. Praca liczy ogółem 132 strony. Składa się z siedmiu rozdziałów merytorycznych, streszczenia, spisu treści, spisu literatury. Rozprawa zawiera również wykaz ważniejszych oznaczeń, symboli i skrótów, spis rysunków oraz tabel. Rozdziały podzielono na zwarte tematycznie podrozdziały. Zamieszczony w pracy wykaz literatury obejmuje 184 pozycje ułożone w kolejności przywoływania ich w tekście pracy.

2. Analiza rozprawy

Autor pracy podjął istotny problem naukowy związany ze zwiększeniem trwałości części maszyn i urządzeń narażonych na zużywanie tribokorozyjne w środowisku morskim. Głównym celem działań mgr inż. M. Kowalskiego było wskazanie skutecznych metod poprawy odporności na zużywanie w warunkach jednoczesnych oddziaływań tarciovych i korozyjnych poprzez nakładanie powłok lub wytwarzanie dodatkowych warstw na stali konstrukcyjnej.

Wiele elementów platform i statków wiertniczych wykonanych jest ze stali konstrukcyjnej (np. części rurociągów, kołnierze). Elementy te mogą ulegać uszkodzeniom wskutek korozyjnego działania wody morskiej oraz wymuszeń mechanicznych (wibracje, zmienne stany naprężenia, współpraca w skojarzeniu ślizgowym). Następstwem owych uszkodzeń są straty materialne oraz skażenie środowiska ewentualnym wyciekami ropy naftowej. Podjęte przez Doktoranta działania mogą zatem przyczynić się do rozwiązania bardzo aktualnych problemów eksploatacyjnych.

Pierwszy rozdział pracy zawiera genezę tematu. Szczególną uwagę w tej części Autor poświęcił opisowi warunków eksploatacji maszyn na platformach i statkach wiertniczych. Wskazał elementy najbardziej narażone na jednoczesne oddziaływania korozyjne i mechaniczne (np. kołnierze rurociągów, cylindry hydrauliczne w układach kompensacyjnych i napinających).

Rozdział drugi pracy to dość obszerny przegląd literatury przedmiotu. W kolejnych podrozdziałach scharakteryzowano aktualny stan wiedzy w następujących obszarach związanych z realizacją rozprawy: korozja morska, tribokorozja, powłoki i warstwy ochronne. W podrozdziale 2.4 mgr inż. M. Kowalski zamieścił wyczerpujące podsumowanie przeglądu literatury. Przede wszystkim jednak wskazał istotne braki w aktualnym stanie wiedzy o skutecznych metodach poprawy odporności na zużywanie tribokorozyjne stali konstrukcyjnej w środowisku morskim. Doktorant jako szczególnie istotne kierunki badań uznał ocenę odporności na tribokorozję:

- powłok stopowych Zn-Ni i analizę ewentualnego wpływu dodatku Mg na przebieg procesu zużywania,
- warstw i powłok o strukturze wielowarstwowej (dominujący kierunek we współczesnej inżynierii materiałowej).

W rozdziale trzecim sformułowana została hipoteza badawcza w następującym brzmieniu: *„Modyfikacja budowy warstw i powłok osadzanych różnymi metodami na powierzchni stali konstrukcyjnej i identyfikacja mechanizmów tribokorozji w obszarze wymuszeń eksploatacyjnych mechanicznych i elektrochemicznych, umożliwi wytworzenie nowoczesnych warstw i powłok, a także warstw hybrydowych odpornych na proces zużywania w warunkach jednoczesnych oddziaływań korozyjno-mechanicznych określanych mianem tribokorozji, w środowisku jonów chlorkowych”*. W dalszej części rozdziału Doktorant określił również główny cel pracy *„polegający na zbadaniu właściwości tribokorozyjnych wytworzonych warstw i powłok na stali konstrukcyjnej C45”* ... *„tak, aby zidentyfikować zakres ich stosowania w warunkach jednoczesnych oddziaływań tarcia i korozji”*.

Treść rozdziału czwartego dotyczy metodyki badań. Ocenie porównawczej poddano trzy powłoki galwaniczne (cynkową, stopową cynkowo-niklową, stopową cynkowo-niklową z 4% dodatkiem magnezu) oraz dwa warianty warstw hybrydowych (warstwa azotowana z utlenianiem a następnie impregnacją preparatami inhibitorowymi, warstwa Cr/CrN osadzana metodą łukową PVD). W grupie powłok galwanicznych powłoka cynkowa stanowiła rozwiązanie referencyjne. Wobec stwierdzonej często w eksploatacji zbyt niskiej trwałości powłoki cynkowej w środowisku morskim, powłoki stopowe stanowią – w opinii Autora pracy – szansę poprawy odporności na zużywanie w warunkach jednoczesnych oddziaływań korozyjnych i mechanicznych. Z kolei warstwy hybrydowe Doktorant uwzględnił z uwagi na ich znacznie lepsze właściwości użytkowe niż powłok jednowarstwowych oraz ewentualne zastosowanie w elementach przenoszących duże obciążenia. Autor scharakteryzował technologie wytwarzania poszczególnych warstw i powłok. W dalszej części rozdziału opisał zastosowane metody badań: składu fazowego, twardości, adhezji warstw i powłok do podłoża, odporności korozyjnej oraz odporności na zużywanie tribokorozyjne. Scharakteryzował wykorzystywaną aparaturę wraz z parametrami badań. W przypadku testów zużyciowych – odwołując się do odpowiednich pozycji literaturowych – uzasadnił zastosowane wymuszenia w węźle ślizgowym pin-on-plate.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań własnych Doktoranta. Odporność na zużywanie tribokorozyjne w środowisku 3,5% NaCl oceniano wykorzystując stanowisko z węzłem modelowym typu pin-on-plate. Kryterium oceny stanowiła głębokość śladu zużycia. W pierwszej serii badań porównywano odporność na tribokorozyję trzech powłok galwanicznych. Testy wykonano stosując obciążenie 5,4N, częstotliwość ruchu przeciwróbki 2 Hz. Każda próba trwała około 30 minut. Największe zużycie stwierdzono w przypadku powłoki cynkowej, najmniejsze dla powłoki cynkowo-niklowej z dodatkiem magnezu. Dodatkowo dokonano oceny odporności na tribokorozyję przy większych wartościach nacisku w strefie styku, stosując siłę obciążającą węzeł tarcia około 9N. Testy te wykonano dla powłok Zn i Zn-Ni-Mg. Dla wszystkich powłok galwanicznych przeprowadzono również testy odporności na zużywanie wyłącznie mechaniczne (w warunkach tarcia suchego, bez środowiska korozyjnego). W przypadku powłoki Zn oraz Zn-Ni-Mg stwierdzono wyraźnie mniejsze zużycie niż w warunkach tribokorozyji. Natomiast powłoka Zn-Ni zużywała się intensywniej podczas tarcia suchego. Stan ten wynika ze znaczącego wpływu wilgotności środowiska eksploatacji na zużywanie mechaniczne powłoki cynkowo-niklowej i jest zgodny z doniesieniami literaturowymi. Zaobserwowana sytuacja wskazuje, że Doktorant podjął się badań w obszarze bardzo złożonych mechanizmów zużycia. W drugiej serii testów

Doktorant ocenił odporność na tribokorozję warstw hybrydowych. Testy wykonano dla częstotliwości ruchu trzpienia 2 Hz oraz obciążenia węzła odpowiednio 9 i 19N. W przypadku obu wartości obciążenia wyraźnie większe zużycie stwierdzono dla warstwy azotowanej z powłoką tlenkową poddanej impregnacji. Przy sile nacisku 5,4N dla warstw hybrydowych nie stwierdzono mierzalnego zużycia.

W rozdziale szóstym Autor pracy dokonał analizy wyników badań własnych. Zidentyfikował główne zależności między właściwościami badanych wariantów materiałowych (twardość, odporność korozyjna) i warunkami wymuszeń a odpornością na tribokorozję. W grupie powłok galwanicznych wariant referencyjny stanowiła powłoka cynkowa. Szans poprawy odporności na tribokorozję powłok galwanicznych Doktorant upatrywał w zwiększeniu ich twardości. Efekt taki uzyskano w przypadku powłok Zn-Ni oraz Zn-Ni-Mg. Obie te powłoki cechują się również wyższą odpornością na korozję w wodzie morskiej. Testy tribokorozyjne wskazują jednak, że wyraźnie najlepszą odporność na tribokorozję wykazuje powłoka Zn-Ni-Mg. Powłoka Zn-Ni (mimo zbliżonych „pierwotnych” właściwości do powłoki Zn-Ni-Mg) w warunkach tribokorozyjji zużywa się intensywniej (porównywalnie z powłoką Zn). Wynika to z faktu, że struktura badanej powłoki Zn-Ni posiada liczne pęknięcia między ziarnami. W przypadku badanych warstw hybrydowych lepszą odpornością korozyjną cechuje się warstwa azotowana. Jednak znacznie większa twardość warstwy Cr/CrN nałożonej metodą PVD zapewnia ostatecznie najlepszą odporność na zużywanie tribokorozyjne. W końcowej części rozdziału szóstego wskazano kierunki dalszych działań. Warto podkreślić, że Autor zamierza kontynuować podjętą w pracy tematykę badawczą.

Rozdział siódmy zawiera wnioski sformułowane przez Doktoranta na podstawie rezultatów badań eksperymentalnych. Między innymi – nawiązując do sformułowanej na wstępie hipotezy – mgr inż. M. Kowalski stwierdził, że *„modyfikacja budowy powłoki galwanicznej cynkowej poprzez wykonanie powłoki galwanicznej stopowej Zn-Ni z 4% dodatkiem magnezu na powierzchni stali konstrukcyjnej C45, umożliwiała”* zwiększenie odporności na zużywanie tribokorozyjne w środowisku morskim.

3. Uwagi merytoryczne

1. Dlaczego w testach tribokorozyjnych na stanowisku z węzłem modelowym typu pin-on-plate stosowano kulki wykonane z różnych materiałów (Al_2O_3 lub Si_3N_4)?
2. Omawiając kierunki dalszych działań (strona 112) Doktorant wspomina o możliwości „*tworzenie map zużycia tribokorozyjnego mających na celu ilustrację relacji w ujęciu zbiorczym pomiędzy wymuszeniami, a intensywnością zużywania*”. Czym są „mapy zużycia”?
3. Sformułowana w pracy hipoteza badawcza zawiera fragment dotyczący identyfikacji mechanizmów tribokorozji. Zawarty w rozdziałach 5 i 6 opis wyników badań nie zawiera zbyt wielu odwołań do tego wątku. Jaka jest najistotniejsza cecha procesu zużywania tribokorozyjnego? W odpowiedzi proszę nawiązać do wyników własnych badań.
4. Czy zamieszczone w pracy wyniki badań odporności na zużywanie tribokorozyjne można zastosować w praktyce do doboru materiału na elementy platform i statków wiertniczych? W odpowiedzi proszę nawiązać do treści zamieszczonych w rozdziale pierwszym „Geneza problemu”.
5. Co Doktorant rozumie jako „żywoćność” części maszyn? Zwrot używany między innymi na stronie 60.
6. Na stronie 66 Doktorant zamieścił informację: „*Próbki wykorzystane do tego testu (na stanowisku do badań tribokozji) posiadają kształt kulisty*”. Próbki te mają kształt dysku (walca). Poprawny opis znajduje się na stronie 76.
7. Na stronie 67 Autor pracy używając niefortunnie skrótu myślowego stwierdza, że „*wszystkie powłoki galwaniczne zostały poddane pasywacji, która zawierała związki chromu trójwartościowego ...*”. Na czym polega proces pasywacji powłok galwanicznych?
8. Co oznacza symbol U_{bias} użyty w tabeli 8 na stronie 70? Symbol ten nie został wyjaśniony w tekście pracy, nie znalazł się również w wykazie na stronie 11.
9. W tekście pracy Doktorant używa wielokrotnie zwrotu „zużycie tribokorozyjne”. W przypadku, gdy określenie to dotyczy ogółu oddziaływań powodujących ubytek materiału należałoby stosować zwrot „zużywanie tribokorozyjne”. Zużycie to efekt procesu zużywania (najczęściej ubytek materiału).

Powyższe sugestie stanowią wskazówki dla Doktoranta do uwzględnienia w przyszłych pracach i publikacjach. Uwagi te nie obniżają merytorycznej wartości pracy.

4. Ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kowalskiego stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

Autor zrealizował główny cel sformułowany w pracy. Zaproponował metody poprawy odporności stali konstrukcyjnej na zużywanie w warunkach tribokorozji w środowisku morskim. Propozycje dotyczyły wytworzenie powłok galwanicznych (3 rodzaje: Zn, Zn-Ni, Zn-Ni-Mg) i powłok hybrydowych (2 rodzaje). Następnie zbadał właściwości nowych rozwiązań materiałowych (twardość, strukturę, odporność na działanie środowiska korozyjnego itp.). W ostatnim etapie oszacował odporność na zużywanie tribokorozyjne wykorzystując stanowisko z węzłem modelowym typu pin-on-plate. Wyniki tej oceny pozwoliły wskazać:

- najlepsze metody poprawy trwałości elementów ze stali konstrukcyjnej narażonych na zużywanie tribokorozyjne w środowisku morskim,
- zakresy stosowania poszczególnych powłok galwanicznych i hybrydowych.

Wyniki badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych zamieszczone w pracy mgr inż. M. Kowalskiego wpisują się znakomicie w mało dotychczas poznane obszary wiedzy o tribokorozji (zgodnie z podrozdziałem 2.4). Warto w tym miejscu podkreślić, że Doktorant redagując tekst rozprawy korzystał z bardzo obszernego studium literatury przedmiotu. Wykorzystał w tym celu publikacje zawierające wyniki badań przeprowadzonych w różnych ośrodkach naukowo-badawczych w Polsce i na świecie a prawie 60% cytowanych w rozprawie publikacji pochodzi z ostatnich 10 lat.

Za główne osiągnięcia Doktoranta można uznać:

- wskazanie metod poprawy trwałości elementów ze stali konstrukcyjnej przewidzianych do eksploatacji w środowisku morskim (wzrost odporności na tribokorozyję); w szczególności propozycja modyfikacji powłoki stopowej cynkowo-niklowej poprzez dodanie magnezu (około 4%),
- eksperymentalną weryfikację skuteczności zaproponowanych metod modyfikacji właściwości stali konstrukcyjnej poprzez wytworzenie odpowiednich powłok (warstw),
- wykazanie, że twardość i odporność na korozyję w warunkach statycznych nie determinują jednoznacznie odporności na zużywanie tribokorozyjne (porównanie powłok Zn-Ni, Zn-Ni-Mg – rozdziały 5 i 6); fakt ten potwierdza potrzebę realizacji specjalistycznych badań tribokorozyjnych w celu oceny porównawczej różnych materiałów.

Rozprawa doktorska mgr inż. M. Kowalskiego napisana jest zrozumiałym językiem. Posiada klasyczny i prawidłowy układ redakcyjny. Prace badawcze i analityczne ułożone są w logiczną całość.

Należy podkreślić, że Doktorant realizując cel pracy nawiązał współpracę z różnymi ośrodkami badawczymi i firmami produkcyjnymi m.in.:

- Instytut Technologii Eksploatacji Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu,
- Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie,
- Firma TEGAL Technologie Galwaniczne sp. z o.o. z siedzibą w Łodzi.

Rezultaty tej współpracy (w zakresie polepszania właściwości stali konstrukcyjnej i badania efektów tych działań) świadczą, że mgr inż. M. Kowalski posiada szczególne zdolności organizacyjne. Ponadto cechuje go duża wnikliwość badawcza i jest dobrze przygotowany metodycznie do samodzielnej pracy badawczej.

Sądzę, że zawarte w pracy wyniki badań eksperymentalnych oraz rezultaty ich analizy mogą być wykorzystane w praktyce eksploatacyjnej. Stanowią istotny przyczynek do rozwiązania aktualnego i ważnego problemu naukowego jakim jest zwiększenie trwałości części maszyn i urządzeń narażonych na zużywanie tribokorozyjne w środowisku morskim.

5. Wniosek końcowy

Na podstawie dokonanej analizy i oceny pracy mgr inż. Marcina Kowalskiego pt.: „Polepszenie trwałości elementów ze stali konstrukcyjnej narażonych na zużycie tribokorozyjne w środowisku morskim” stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odpowiednią ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

