

dr hab. inż. Andrzej Dzierwa, prof. uczelni
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
ul. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów
tel. +48 17 7432546
e-mail: adzierwa@prz.edu.pl

Rzeszów, 17.05.2024

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

mgr inż. Justyny Sokolskiej

pt. „Mechanizm zużywania ściernego wybranych powłok poliuretanowych w różnych warunkach eksploatacyjnych”

Podstawą recenzji jest pismo o numerze W10/D/33/2024 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 26 kwietnia 2024 roku.

1. Uzasadnienie podjętego problemu

Niezawodność maszyn i urządzeń charakteryzuje się głównie odpornością na działanie procesów destrukcyjnych. Procesy destrukcyjne mają najczęściej charakter złożony – z reguły występuje nie tylko jeden podstawowy proces ale kilka i z różnym natężeniem. Właściwości użytkowe elementów części maszyn zależą od wielu czynników: materiałowych, konstrukcyjnych, technologicznych oraz eksploatacyjnych. W wyniku zachodzących zmian fizyko – chemicznych elementów, tj. zużycia par trących, zmęczenia materiału, procesów korozyjnych itp. następuje obniżenie niezawodności, podwyższenie uszkodzalności czy też zmniejszenie wydajności obiektów.

Różnorodność środowisk technologicznych występujących w maszynach i urządzeniach przemysłowych powoduje iż elementy węzłów ruchowych ulegają szybkiemu zużyciu pod wpływem jednoczesnego oddziaływania wymuszeń tarcowych, ściernych i korozyjnych. Ze względu na zmienność warunków pracy, zużycie elementów urządzeń jest zróżnicowane. Ponieważ zużywanie w większości przypadków prowadzi do obniżenia potencjału eksploatacyjnego maszyn i ich elementów powinno się mu przeciwdziałać.

Wzrastające wymagania stawiane materiałom konstrukcyjnym spowodowały, że nieustannie podejmowane są próby wytwarzania nowych rodzajów lub modyfikacji istniejących już zabezpieczeń przeciwzużyciowych, m.in. poprzez zmianę składu chemicznego powłok lub technologii jej wytwarzania.

Rozprawa pt. „*Mechanizm zużywania ściernego wybranych powłok poliuretanowych w różnych warunkach eksploatacyjnych*” realizowana pod opieką naukową promotora dr hab. inż. Dymitry Capanidisa oraz przy wsparciu merytorycznym i metodycznym promotora pomocniczego dr inż. Anity Ptak, identyfikuje ten mechanizm w przypadku zużywania ściernego i erozyjnego a także określa wpływ wybranych warunków eksploatacyjnych na intensywność zużycia ściernego i erozyjnego tych powłok. W tym celu Doktorantka przygotowała odpowiedni materiał badawczy w postaci próbek z powłokami poliuretanowymi i polimocznikowymi różniących się sposobem ich przygotowania oraz uwzględniający kilka wariantów grubości powłok, zrealizowała badania eksperymentalne oraz przeprowadziła stosowną analizę otrzymanych wyników. Uzyskane rezultaty pozwoliły na sformułowanie wniosków naukowych, wniosków użytkowych a także przyczyniły się do wyznaczenia kierunków dalszych badań.

Można zatem stwierdzić, że przedstawiona praca doktorska Pani mgr inż. Justyny Sokolskiej wpisuje się swoją tematyką i zrealizowanym zakresem prac w aktualne obszary badań nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Prezentowana do recenzji praca liczy 117 stron i obejmuje stronę tytułową (1 strona), spis treści (1 strona), streszczenie w języku polskim (1 strona) i angielskim (1 strona), siedem rozdziałów podzielonych na zwarte tematycznie podrozdziały (102 strony) oraz bibliografię (11 stron). Spis literatury zawiera 136 pozycji w tym dwie firmowe strony internetowe oraz dwie normy. Znaczna liczba prac (23) opublikowana została w oraz po roku 2020. Jedna z zaprezentowanych prac jest współautorstwa Doktorantki. Kolejność rozdziałów, podrozdziałów oraz podział treści tworzą logiczny i spójny układ pracy. Praca oprócz tekstu zawiera 60 rysunków i 10 tabel.

Rozprawę rozpoczyna krótkie „Wprowadzenie”, w którym Autorka sygnalizuje powody dla których podjęła się realizacji danej tematyki w pracy doktorskiej, konkludując to tym, iż zagadnienia tribologii powłok poliuretanowych nie są zbyt obszernie poruszane w literaturze przedmiotu.

Rozdział 2 liczący 33 strony zatytułowany jest „*Przegląd literatury – analiza stanu wiedzy*”. W rozdziale tym, na podstawie analizy przedmiotowej literatury, Autorka dokonuje

charakterystyki materiałów poliuretanowych. Wskazuje na istnienie szeregu różnorodnych materiałów poliuretanowych (m.in. pianki poliuretanowe, elastomery poliuretanowe czy też kompozyty poliuretanowe) znajdujących szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu (m.in. motoryzacja, budownictwo, elektronika, meblarstwo itd.). Obszerną część rozdziału Doktorantka poświęca powłokom poliuretanowym dzieląc je na powłoki jedno i dwukomponentowe a także wskazując i charakteryzując substancje pomocnicze stosowane przy wytwarzaniu tychże powłok. Autorka omawia również procedurę nanoszenia powłok (przygotowanie przedmiotu i jego powierzchni, naniesienie powłoki, obróbka wykończeniowa) charakteryzując szczegółowo metody ich nanoszenia. W rozdziale tym zaprezentowano również możliwe zastosowania powłok poliuretanowych jak i rodzaje uszkodzeń na które narażone są omawiane powłoki. Obszerną część rozdziału Doktorantka poświęca zagadnieniom tribologicznym – zagadnieniom zużywania tribologicznego. Autorka omawia aspekty procesu zużywania tribologicznego materiałów polimerowych (w tym powłok poliuretanowych) ze szczególnym uwzględnieniem procesów zużywania ściernego i erozyjnego. Rozdział wprawdzie nie kończy się podsumowaniem przeglądu literatury, jednakże złożoność procesu zużywania materiałów polimerowych (w tym powłok poliuretanowych) jak i niejednoznaczność wyników badań zaprezentowana w ostatnim podrozdziale uzasadnia wybór tematyki rozprawy.

W rozdziale trzecim Autorka prezentuje cel naukowy pracy, którym jest: *„identyfikacja mechanizmu zużywania ściernego i erozyjnego w różnych rodzajach powłok poliuretanowych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych”*, a także cel użytkowy jakim jest: *„określenie wpływu warunków eksploatacyjnych na intensywność zużycia ściernego i erozyjnego różnych rodzajów powłok poliuretanowych”*. Cele zostały sformułowane poprawnie. Aby zrealizować założone cele Doktorantka planuje przeprowadzić badania czterech rodzajów powłok poliuretanowych lub polimocznikowych w zakresie:

- badań zużycia ściernego przy zmiennej granulacji ziarna ściernego oraz zmiennych parametrach powłok;
- badań zużycia ściernego przy zmiennej granulacji ziarna ściernego oraz zmiennych parametrach powłok;
- badań uzupełniających (badania topografii powierzchni, badania mikroskopowe);
- identyfikacji mechanizmu zużywania ściernego i erozyjnego.

Ogólną sekwencję kroków niezbędnych do realizacji założonych celów prezentuje zawarty pod koniec rozdziału schemat planu badawczego.

Rozdział 4 to *„Metody badawcze”*. Doktorantka prezentuje w nim rodzaje badań, które zamierza przeprowadzić a także niezbędną do tego aparaturę. Do badań zużycia ściernego wykorzystano tester tribologiczny T-07, natomiast do badań zużycia erozyjnego zbudowano autorskie urządzenie badawcze. W rozdziale podano ponadto wymiary badanych próbek oraz

warunki badań. Zaprezentowano także wielkość ziaren ściernych użytych w badaniach tribologicznych. Oznaczenie granulacji elektrokorundu F90 przywołano na podstawie wycofanej już normy – obecnie obowiązujące normy to PN-ISO 8486-1:1998 oraz PN-ISO 8486-2:1998. Do zobrazowania próbek wykorzystano mikroskopy skaningowe Phenom ProX G5 oraz Phenom XL. Badania struktury geometrycznej powierzchni przeprowadzono za pomocą profilometru optycznego Leica DCM8 oraz optycznego mikroskopu cyfrowego Leica DMS300. Do badań wyselekcjonowano następujące rodzaje powłok:

- żywiczna powłoka poliuretanowa w czterech wariantach grubości,
- powłoka polimocznikowa w dwóch wariantach grubości,
- hybrydowa powłoka poliuretanowo-polimocznikowa w dwóch wariantach grubości,
- elastomerowa powłoka poliuretanowa o jednakowej grubości ale o pięciu wariantach twardości.

O ile uzasadnienie wyboru wspomnianych powłok nie budzi wątpliwości (*szerokie zastosowanie w przemyśle jako ochrona przed zużywaniem ściernym, erozyjnym oraz korozją*) o tyle brak jest argumentacji wyboru grubości nanoszonych powłok. W końcowej części rozdziału Autorka prezentuje jakie elementy analizy statystycznej wykorzystała w analizie wyników badań.

Najobszerniejszy rozdział pracy liczący 53 strony to rozdział 5 „*Analiza procesów zużywania*”. Zestawiono w nim wyniki otrzymanych badań zarówno w postaci tabelarycznej jak i w postaci graficznej (wykresy, obrazy SEM, widoki izometryczne) oraz dokonano analizy otrzymanych wyników badań. Pierwsza część tego rozdziału poświęcona jest badaniom zużycia ściernego. Zaprezentowane obrazy SEM umożliwiły określenie dominujących procesów zużyciowych poszczególnych powłok, m.in. obecność bruzd, pęknięć, śladów oderwania cząstek materiału w wyniku mikroskrawania itp. Badania wpływu wielkości ziaren ściernych na wielkość zużycia ściernego (wagowego) wykazały, że granulacja ziaren F90 powodowała największe wagowe zużycie wszystkich powłok. Jako możliwą przyczynę tego stanu rzeczy podano, że większe ziarna ściernie mogą powodować większe zużycie pomimo większej ilości mniejszych ziaren w tej samej objętości ścierniwa. Nasuwa się jednak pytanie o granulację ziaren F70, która posiada jeszcze większe ziarna niż F90 a charakteryzuje się nieco mniejszym zużyciem wagowym. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono także, że twardość i grubość powłoki mają istotny wpływ zarówno na zużycie ściernie wagowe jak również na wskaźnik odporności na ścieranie K_b . Doktorantka zaznacza również, że na wspomniane parametry wyjściowe istotny wpływ mają także własności powłoki wynikające z jej budowy chemicznej a można przypuszczać że także metoda naniesienia powłoki.

Druga część rozdziału 5 „*Analiza procesów zużywania*” poświęcona jest badaniom zużycia erozyjnego, przeprowadzanym na autorskim stanowisku badawczym dla wybranych powłok poliuretanowych o jednakowej grubości. Nie określono jednak precyzyjnie czy chodzi

o grubość powłoki równą 3,0 mm? Podobnie jak w badaniach zużycia ściernego wykorzystano obrazowanie SEM w celu ujawnienia dominujących procesów zużyciowych w zależności od kąta padania cząstek erozyjnych. Stwierdzono, że największe zużycie erozyjne zachodzi przy małych kątach padania cząstek erozyjnych. Autorka konkluduje, że możliwą przyczyną tego stanu rzeczy jest występowanie, obok działania erozyjnego, jednoczesnego zużywania ściernego powłoki. Z kolei badania wpływu wielkości ziaren erozyjnych na wielkość zużycia erozyjnego wykazały, że największe zużycie powłok występowało przy granulacji ziaren F120. W pracy porównano również obrazy SEM cząstek elektrokorundu zarówno przed jak i po badaniach zużycia ściernego i erozyjnego. Porównując ziarna przed i po badaniach nie zauważono znaczących różnic w ich rozmiarze i kształcie w przypadku obu rodzajów badań.

W rozdziale 6 „*Mechanizm zużywania ściernego i erozyjnego powłok poliuretanowych*” Doktorantka przedstawia ogólny mechanizm zużywania wspomnianych powłok. W przypadku zużywania ściernego oddziaływanie ziaren powoduje ubytek materiału powłoki a intensywność tego zjawiska zależna jest od jej podatności na odkształcenia sprężyste. W przypadku powłok miękkich można mówić o zmęczeniowym charakterze zużywania, natomiast przy bardziej sztywnych o mikroskrawaniu. Mechanizm zużywania erozyjnego powłok jest procesem złożonym, zależnym przede wszystkim od kąta padania cząstek erozyjnych oraz własności sprężystych powłoki. Jak zauważa Autorka, zmniejszanie kąta padania cząstek na powierzchnię powłoki z 90° do 45° powoduje stopniową zmianę charakteru zużywania – z mikropęknięć i ich propagacji na skutek efektu zmęczeniowego a następnie wykruszeń materiału do charakteru odkształceniowo-ubytkowego typowego dla zużycia ściernego.

Rozdział 7 to „*Podsumowanie i wnioski końcowe*” w którym Doktorantka syntetycznie podsumowuje wyniki swojej pracy. Na podstawie przeprowadzonych badań formułuje wnioski o charakterze naukowym oraz użytecznym a także nakreśla kierunki dalszych badań.

Ostatni rozdział rozprawy to „*Literatura*” w której Autorka przedstawia 136 źródeł bibliograficznych wykorzystanych w Rozprawie w kolejności ich występowania w tekście.

3. Ocena pracy, uwagi ogólne i szczegółowe

Przedłożona do recenzji praca doktorska jest oryginalną pracą naukową łączącą w sobie zarówno elementy poznawcze jak i użyteczne. Odpowiada przyjętym celom, zadaniom badawczym i jest dostosowana do obowiązujących wymogów. Została napisana zrozumiałym językiem w staranny sposób, bez znaczących niedociągnięć od strony stylistycznej i językowej (nieliczne literówki). W celu realizacji założonych badań dobrano i scharakteryzowano cztery rodzaje powłok poliuretanowych i polimocznikowych o różnych wariantach grubości, zbudowano autorskie urządzenie badawcze do badań zużycia erozyjnego a także przeprowadzono szereg badań z wykorzystaniem zaawansowanej aparatury badawczo-

pomiarowej. Liczba wykonywanych testów, liczba ich powtórzeń a także wykorzystanie narzędzi badawczo-analitycznych świadczy o dobrym przygotowaniu Doktorantki do planowania i prowadzenia prac eksperymentalnych, stanowiąc jednocześnie dobrą podstawę do samodzielnego prowadzenia dalszych prac naukowych. Podczas zapoznawania się z treścią Rozprawy nasunęły się następujące uwagi:

- W przeglądzie literatury zaprezentowane są metody oczyszczania podłoża przed nałożeniem powłoki. Jaka jest różnica w ocenie powierzchni w przypadku obróbki Sa 1 oraz Sa 2 (zgrubna i gruntowna obróbka strumieniowo ścierna)? Z tekstu na stronie 12 trudno dostrzec różnice w ich ocenie.
- Z czego wynikały problemy w uzyskaniu przepływu mieszaniny powietrza ze ścierniwem przez otwór dyszy o średnicy 1,5 mm w przypadku urządzenia do badań zużycia erozyjnego (str. 40)?
- Na jakiej podstawie dobrano grubości nanoszonych powłok poddane badaniom w Rozprawie?
- Jaka była chropowatość blachy stalowej przed nałożeniem powłok? Czy w jakiś sposób określano przyczepność i szczelność powłok?
- W jakim celu podano w wynikach badań parametr chropowatości Ra w przypadku gdy określany był parametr Sa? Ponadto do lepszej charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni warto byłoby użyć np. parametrów krzywej udziału materiałowego a nie tylko parametrów amplitudowych.
- W trzecim wniosku użytkowym Doktorantka stwierdza, że największy wpływ twardości na zużycie erozyjne można zauważyć przy kącie padania cząstek erozyjnych równym 45° . Nasuwa się pytanie dlaczego tak się dzieje?
- Zauważone drobne usterki natury edytorsko – redakcyjnej:
 - ✓ literówki, np. na stronie 8 powinno być powłoki a nie powłok, na stronie 23 powinno być adhezyjne a nie adjezyjne; str. 53 powinno być średnią a nie średniaą;
 - ✓ str. 30 „... w pracach stwierdza się...” – brak odnośnika w jakich pracach;
 - ✓ str. 73 winno być tab. 5.7 (zamiast 5.3); w podpisach pod rys. 87-89 parametr chropowatości to parametr Ra a nie R.

Przedstawione powyżej uwagi mają jednak w większości charakter dyskusyjny i nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej ocenianej Rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską Pani mgr inż. Justyny Sokolskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie. Podjęta w pracy tematyka jest ważna i aktualna a wyniki badań eksperymentalnych są dobrze udokumentowane i poddane poprawnej analizie. Cele badawcze zaprezentowane

w Rozprawie zostały osiągnięte a zawarty w niej materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Doktorantki, potwierdzając tym samym umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Rozprawa stanowi niewątpliwą wkład do istniejącego stanu wiedzy w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn w zakresie tribologii.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Justyny Sokolskiej pt. *„Mechanizm zużywania ściernego wybranych powłok poliuretanowych w różnych warunkach eksploatacyjnych”* spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej.

Andrzej Dzierwa