

dr hab. inż. Arkadiusz Stachowiak, prof. PP
Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
pl. Marii Skłodowskiej-Curie 5
60-965 Poznań

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Wójcickiego

**nt. „Identyfikacja synergizmu oddziaływania czynników środowiska kopalnianego
w aspekcie ograniczenia zużycia ogniw łańcuchowych przenośników zgrzeblowych”**

Recenzja opracowana na podstawie pisma numer RIE-BD.512.42.2025 z dnia 03-10-2025

Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. Krzysztofa Labusa

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Andrzej Norbert Wieczorek, prof.
Politechniki Śląskiej a opiekunem zakładowym dr inż. Krzysztof Nieśpiałowski.

1. Charakterystyka podjętego problemu

Autor pracy podjął istotny problem badawczy związany ze zwiększeniem trwałości części maszyn i urządzeń. Trwałość obiektów technicznych determinowana jest postępującymi procesami zużywania. Wydłużenie okresu eksploatacji maszyn i urządzeń (czasu pracy do momentu osiągnięcia granicznej wartości zużycia) to ciągle aktualne wyzwanie dla konstruktorów i użytkowników, z uwagi na minimalizację kosztów oraz optymalne wykorzystanie zasobów materiałowych. Skuteczną metodą działania w celu zwiększenia trwałości obiektów technicznych jest poznanie mechanizmów powodujących ich zużywanie. Wiedza o elementarnych mechanizmach zużywania pozwala konstruktorom bardziej świadomie i skutecznie kształtować właściwości węzłów tarcia. W wielu przypadkach węzły tarcia maszyn i urządzeń podlegają zużyciu w wyniku oddziaływania więcej niż jednego mechanizmu niszczącego. Przykładem może być proces tribokorozji, w którym ubytek materiału determinowany jest przez jednoczesne oddziaływania tarciove i korozyjne. W takich warunkach efekt interakcji tarcia i korozji ma zazwyczaj znaczący wpływ na całkowite zużycie. Z tego powodu w ostatnich latach coraz więcej wyników badań i analiz publikowanych w

czasopismach tribologicznych koncentruje się na identyfikacji efektów interakcji (najczęściej synergii) funkcjonujących jednocześnie w węźle tarcia elementarnych mechanizmów niszczących.

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Wójcickiego doskonale wpisuje się w ten nurt badawczy. Doktorant zrealizował w tym zakresie bardzo oryginalne badania. Podjął się identyfikacji synergizmu oddziaływań powodujących zużywanie dla rzeczywistego węzła tarcia w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Przeprowadził badania zużyciowe ogniów łańcuchowych przenośnika zgrzeblowego w obecności wody kopalnianej i pozyskanego z kopalni kruszywa uwzględniając dodatkowo zmienność obciążenia. Główny celem poznawczym pracy była „identyfikacja synergizmu oddziaływania czynników środowiska kopalnianego w procesie zużywania ogniów łańcuchowych przenośników zgrzeblowych”.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Praca liczy ogółem 212 stron i składa się z dziesięciu rozdziałów merytorycznych, spisu oznaczeń, spisu treści, spisu literatury i streszczenia w języku polskim oraz angielskim. Większość rozdziałów została podzielona na zwarte tematycznie podrozdziały. Zamieszczony w pracy spis literatury obejmuje 116 pozycji ułożonych w kolejności przywoływania ich w tekście pracy. Wśród nich znajdują się 3 publikacje współautorstwa Doktoranta.

Pracę rozpoczyna Wprowadzenie, w którym Autor krótko charakteryzuje najważniejsze czynniki skracające trwałość łańcuchów ogniowych stosowanych w górnictwie podziemnym. Podaje również definicję synergizmu procesów zużywania istotną dla sformułowania głównego celu rozprawy.

W drugim rozdziale Doktorant uzasadnia celowość podjęcia tematyki badawczej. Zamieszcza dość obszerny przegląd literatury obejmujący zagadnienia dotyczące procesów zużywania ogniów łańcuchów przenośników zgrzeblowych. Opisuje różne mechanizmy niszczenia zwracając uwagę na możliwe oddziaływania o charakterze synergii. Zamieszczony w rozdziale przegląd literatury wskazuje na istnienie luki badawczej: „Aktualnie, w literaturze dotyczącej tematyki pracy, nie ma wyników badań zużycia wieloczynnikowego, zwłaszcza dla połączenia czynników degradacyjnych: ścierniwo, woda i wzbudzenia impulsowe, dotyczących stali stosowanych na górnicze łańcuchy ogniowe.”

W rozdziale trzecim sformułowano problem badawczy oraz cel poznawczy pracy. Doktorant postawił także hipotezę badawczą: „Łączne oddziaływanie ścierniwa i zmiennych sił dynamicznych w otoczeniu czynników korozyjnych, jak i też bez nich, skutkuje

dotatkowym efektem interakcyjnym w trakcie procesu zużycia wieloczynnikowego ogniw łańcuchowych.” Rozdział kończy krótkie streszczenie rozprawy doktorskiej.

Rozdział czwarty poświęcono górnictwom łańcuchom ogniwowym. Przedstawiono ich charakterystykę konstrukcyjną, proces produkcji oraz problemy związane z eksploatacją.

Kolejny piąty rozdział zawiera charakterystykę procesu badawczego. W sposób schematyczny poszczególne etapy badań przedstawiono na rysunku 5.1. Natomiast w tabeli 5.1 zilustrowano warianty badań stanowiskowych (wyróżniono 12 wariantów czynników mających wpływ na intensywność zużycia). W tym rozdziale Doktorant opisał również zaprojektowane przez siebie stanowisko badawcze oraz sposób realizacji stanowiskowych badań zużyciowych. Dość obszernie przedstawił kwestie oszacowania błędów pomiarowych. Końcowa część rozdziału zawiera charakterystykę badań wykonanych dla ustalenia obciążenia układu badawczego oraz dodatkowych metod pomiarowych (analiza składu chemicznego i mineralnego ścierniwi, analiza składu chemicznego wód kopalnianych, badania warstwy wierzchniej śladu zużycia).

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki badań wykonanych dla identyfikacji czynników charakteryzujących warunki środowiska górnictwa w celu ich odwzorowania podczas stanowiskowych testów zużyciowych. Na tym etapie Doktorant określił wartości wymuszeń mechanicznych dla węzła tarcia (w tym charakter zmienności obciążeń dynamicznych w łańcuchu zgrzeblowym) oraz charakterystyczne właściwości ścierniwa i wód kopalnianych. Mgr inż. Mateusz Wójcicki zbadał wiele parametrów charakteryzujących ścierniwo oraz wodę. Uważam, że uzyskane wyniki należało lepiej powiązać opisem z mechanizmami zużycia ogniw łańcuchowych.

Rozdział siódmy zawiera wyniki badań laboratoryjnych tzn. badania szybkości korozji ogniw łańcuchowych z wykorzystaniem potencjostatu w środowisku wód kopalnianych oraz mieszaniny woda kopalniana – kruszywo, badania zużycia ściernego z zastosowaniem kruszywa i mieszaniny woda – kruszywo. Celem tych badań było wytypowanie materiałów (woda kopalniana, kruszywo) do zasadniczych stanowiskowych testów zużycia ogniw łańcuchowych.

Wyniki stanowiskowych badań zużycia ogniw łańcuchów górnictwa zamieszczono w rozdziale ósmym. Dla każdej z 12 serii testów (wariantów czynników wymuszających) określono: średni ubytek masy próbki, maksymalną głębokość śladu zużycia. Zidentyfikowano także elementarne mechanizmy powodujące zużycie. Wykorzystano w tym celu w tym celu obserwacje mikroskopowe (SEM) śladów zużycia oraz pomiar twardości śladów zużycia.

W rozdziale dziewiątym dokonano identyfikacji oddziaływań interakcyjnych w procesie zużywania ogniw łańcuchowych. Doktorant wykorzystał w tym celu własny model opisujący skutki wieloczynnikowego procesu zużywania. Oryginalność zaproponowanej koncepcji polega na możliwości ilościowej identyfikacji efektu interakcyjnych oddziaływań między ścierniwem, dynamicznym obciążeniem i środowiskiem korozyjnym. Do prezentacji wyników zużycia w poszczególnych seriach testów (grupach czynników mających wpływ na intensywność zużywania) Doktorant zastosował między innymi grafy. Taka forma ilustruje dobrze koncepcję selekcji składowych zużycia oraz relacje wartości liczbowych zużycia materiału.

Ostatni dziesiąty rozdział zawiera podsumowanie. Doktorant prezentuje w nim wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Potwierdza również słuszność przyjętej na wstępie hipotezy badawczej o występowaniu w procesie zużywania ogniw łańcuchowych efektu synergii oddziaływań ścierniwa i zmiennych sił dynamicznych w otoczeniu czynników korozyjnych. W tym rozdziale Doktorant wskazuje również na możliwości wdrożenia rezultatów pracy doktorskiej (aspekt wdrożeniowy). Opracowano bowiem koncepcję stanowiska badawczego przeznaczonego do badań łańcuchów przenośników ścianowych o rozmiarach stosowanych w krajowym górnictwie. Tekst rozprawy kończą informacje o dalszych kierunkach badań.

3. Uwagi krytyczne oraz dyskusyjne

1. Oceniana praca jest bardzo obszerna (212 stron). Z jednej strony jest to uzasadnione. Złożony problem badawczy i liczne badania eksperymentalne wymagają odpowiedniego opisu. Jednak czytając całość odnosi się wrażenie, że pewne treści są powtarzane w kolejnych rozdziałach. Mam na myśli fragmenty wprowadzające czytelnika w kolejnych rozdziałach w koncepcję modelu i idei badań. Uważam, że wystarczyłoby wskazanie wcześniej zamieszczonych tabel czy rysunków dobrze ilustrujących koncepcję złożonych analiz i badań (np. Tabela 5.1).
2. Doktorant przyjął założenie (strona 57), że „dobór parametrów badań zostanie oparty na parametrach rzeczywistego obiektu – ratowniczego przenośnika zgrzeblowego ...”. Czym był podyktowany ten wybór? Czy wybór stanowi ograniczenie w ewentualnym uogólnianiu uzyskanych wyników badań zużycia ogniw łańcuchowych w przypadku analizy innych typów przenośników zgrzeblowych?
3. Przedstawiając wyniki badań zużycia ogniw Doktorant wykorzystuje dwie miary: średni ubytek masy próbek (wyrażony w [g]) oraz maksymalną głębokość zużycia (wyrażoną w

- [mm]). Czy między tymi wielkościami istnieje jakaś korelacja? Który z tych parametrów jest skuteczniejszy w ocenie różnic między wynikami poszczególnych serii pomiarowych?
4. We Wnioskach (strona 199) Doktorant stwierdza, że „Dodatkowe wymuszenia dynamiczne wpływają na sumaryczne zużycie ogniw łańcuchowych, jednakże skutek ich jest złożony, gdyż ma charakter antagonistyczny, jak i też synergistyczny”. Na kolejnej stronie 202 zamieszczono natomiast informację, że w koncepcji stanowiska do badań pełnoskalowych zrezygnowano z mechanizmów generujących dodatkowe obciążenia dynamiczne. Decyzję taką Doktorant wyjaśnia pisząc, że „została podjęta na podstawie analizy wyników wcześniejszych testów, które wykazały, że wpływ obciążeń dynamicznych na ogólny poziom zużycia ogniw nie zmienił w sposób znaczący poziomu tego zużycia.” Proszę o komentarz do tych dwóch różnych ocen wpływu wymuszeń dynamicznych na zużycie ogniw łańcuchowych.
5. Doktorant opisując model interakcyjny procesu zużycia Wariantu 9 (przypadek kąтового przemieszczania ogniw łańcuchowych poddanych stałemu obciążeniu grawitacyjnemu w obecności wody kopalnianej) we wzorze 9.29 (strona 178) nie uwzględnił składowej wyrażającej interakcję między oddziaływaniami mechanicznymi i korozyjnymi. Uważam, że ten fakt wymaga wyjaśnienia. W klasycznym układzie tribokorozyjnym taki efekt może występować.

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. Mateusza Wójcickiego stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Główny cel pracy został zrealizowany. Na podstawie wyników wykonanego przez Doktoranta eksperymentu badawczego zidentyfikowano synergizm oddziaływania czynników środowiska kopalnianego w procesie zużywania ogniw łańcuchowych przenośników zgrzeblowych.

Oceniana rozprawa doktorska napisana jest zrozumiałym językiem. Posiada klasyczny i prawidłowy układ redakcyjny. Prace badawcze i analityczne ułożone są w logiczną całość. Doktorant redagując tekst rozprawy korzystał z obszernego studium literatury przedmiotu. Wykorzystał publikacje zawierające wyniki badań przeprowadzonych w różnych ośrodkach naukowo-badawczych w Polsce i na świecie. Ponad 25% cytowanych w rozprawie publikacji pochodzi z ostatnich 10 lat.

Główne osiągnięcia Doktoranta przedstawione w ocenianej pracy to:

1. model obliczeniowy, który umożliwia selekcję składowych zużycia ogni w łańcuchowych z uwzględnieniem 4 elementarnych czynników determinujących ubytek materiału a przede wszystkim ich dwu- oraz trzyczynnikowych interakcji,
2. projekt i budowa stanowiska badawczego umożliwiającego realizację testów zużyciowych ogni łańcuchowych w przegubie przy różnych wymuszeniach (12 wariantów czynników mających wpływ na intensywność zużywania),
3. eksperymentalna identyfikacja synergizmu (lub antagonizmu) oddziaływania czynników kopalnianego środowiska eksploatacji w procesie zużywania ogni łańcuchowych (ze szczególnym uwzględnieniem wpływu wymuszeń dynamicznych),
4. zidentyfikowanie wpływu zmiennych sił dynamicznych na zużycie całkowite (oraz jego składowe) ogni łańcuchowych przenośników zgrzeblowych,
5. możliwość realizacji opracowanej metody badań (koncepcja modelu oddziaływań + stanowisko badawcze) w praktyce u pracodawcy Autora pracy (efekt wdrożeniowy).

Doktorant podjął trudne zadanie badawcze podziału zmierzonej wartości zużycia ogni łańcuchowych na kilka składowych charakteryzujących bardziej elementarne oddziaływania niszczące. Warto podkreślić, że autorską koncepcję analizy skutków procesu zużywania powiązał z rzeczywistymi warunkami eksploatacji przenośników zgrzeblowych w kopalniach. Uwzględnił cztery zasadnicze czynniki determinujące zużywania: oddziaływania tarciove ogni łańcuchowych, ściernie działanie kruszywa, korozyjne działanie wód kopalnianych, wymuszenia dynamiczne (zmiennie obciążenie). Przede wszystkim jednak skoncentrował się na dwu- i trzyczynnikowych interakcjach tych czynników (mechanizmów zużywania). Na uwagę zasługuje fakt, że Doktorant zaproponował kompleksowy opis procesu zużywania mając jednocześnie na uwadze możliwość eksperymentalnej identyfikacji poszczególnych składowych.

Mgr inż. Mateusz Wójcicki zaprojektował i wykonał złożone stanowisko badawcze umożliwiające ocenę skutków procesu zużywania ogni łańcuchów przenośników zgrzeblowych w warunkach skojarzonego oddziaływania czynników środowiska eksploatacji (w warunkach zbliżonych do rzeczywistych). Stanowisko wyposażył w niezbędną aparaturę kontrolno-pomiarową. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że Doktorant działania projektowe oraz planowanie eksperymentu poprzedził gruntowną analizą rzeczywistego obiektu – jego konstrukcji, warunków pracy oraz środowiska eksploatacji. Na tej podstawie podejmował decyzje konstrukcyjne mając na uwadze odwzorowanie warunków pracy analizowanego węzła

tarcia w wariancie zapewniającym uzyskanie wyraźnego zużycia przy akceptowalnym czasie trwania testu. Ponadto należy podkreślić, że mgr inż. M. Wójcicki w działaniach projektowych wykazał się praktycznymi umiejętnościami inżynierskimi w zakresie wykorzystania profesjonalnych narzędzi komputerowych do analiz wytrzymałościowych.

Autorskie stanowisko badawcze i przemyślany plan badań pozwoliły mgr inż. Mateuszowi Wójcickiemu zrealizować wieloetapowy eksperyment „symulowanego” zużycia ogniw łańcuchów przenośników zgrzebłowych oraz zidentyfikować wartości postulowanych wcześniej składowych zużycia. Należy podkreślić, że badania były wieloetapowe (uwzględniono 12 wariantów czynników mających wpływ na intensywność zużywania) i czasochłonne (780 godzin testów stanowiskowych). Oryginalność przeprowadzonych badań wynika również z faktu, że w testach wykorzystano kruszywo i wodę pozyskane z kopalni.

Przede wszystkim jednak na podstawie wyników testów zużyciowych Doktorant oszacował wartości składowych zużycia ogniw łańcuchowych będących efektem wzajemnego oddziaływania dwóch lub trzech czynników wymuszających. Uzyskane rezultaty pozwoliły w większości przypadków zidentyfikować postulowany we wstępie pracy synergizm oddziaływania czynników kopalnianego środowiska eksploatacji w procesie zużywania ogniw łańcuchowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje również interpretacja wyników obliczeń. Doktorant wskazał bowiem prawdopodobne mechanizmy potęgujące lub tłumiące interakcyjne oddziaływania w procesie zużywania. Umiejętnie w tym celu wykorzystał dodatkowe wyniki badań: obserwacje mikroskopowe powierzchni śladów zużycia i ścierniwa, pomiar twardości w śladzie zużycia (identyfikacja umocnienia materiału lub jego braku). Takie działania nadają wiarygodności zaproponowanej teoretycznej koncepcji identyfikacji składowych zużycia. Wyniki analizy matematycznej wsparte są analizą oddziaływań natury fizycznej lub chemicznej.

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Wójcickiego jest jednym z nielicznych opracowań w literaturze tribologicznej, w której uwzględniono wpływ zmiennych sił dynamicznych na zużycie całkowite węzłów tarcia (oraz jego składowe). W tym zakresie badawczym należy podkreślić dwa osiągnięcia Doktoranta:

- eksperymentalne wykazanie, że zmienne siły dynamiczne mogą wpływać (na zasadzie interakcji) na towarzyszące im elementarne procesy zużywania (np. zużywanie ściernie); wpływ ten jest złożony, gdyż ma charakter antagonizmu lub synergii,
- projekt i wykonanie specjalistycznego stanowiska w celu identyfikacji charakterystyki zmienności sił dynamicznych obciążających ogniwa łańcuchowe; wyniki badań

przeprowadzonych dla rzeczywistego przenośnika zgrzeblowego odwzorowano podczas zasadniczych testów zużyciowych.

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Wójcickiego posiada również bardzo duży walor użytkowy. Efekt wdrożeniowy wynika z faktu, że realizacja opisanych w pracy badań zużycia ogniw łańcuchów może być usługą badawczą realizowaną u pracodawcy Autora pracy.

5. Podsumowanie

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Wójcickiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, istotne pod względem naukowym oraz praktyki przemysłowej w zakresie szeroko pojętej tribologii oraz eksploatacji maszyn (szczególnie przenośników zgrzeblowych wykorzystywanych w górnictwie).

Na podstawie przedłożonej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że mgr inż. Mateusz Wójcicki wykazał się dużą wiedzą naukową oraz techniczną. Identyfikacja problemu badawczego poprzez obserwację rzeczywistego obiektu technicznego i środowiska eksploatacji, zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego, sformułowanie modelu matematycznego selekcji składowych zużycia, realizacja wieloetapowego eksperymentu, wnikliwa analiza uzyskanych wyników badań z identyfikacją synergii oddziaływania czynników kopalnianego środowiska eksploatacji w procesie zużywania ogniw łańcuchowych, świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz o dużej wiedzy Doktoranta.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Wójcickiego kwalifikuje się do wyróżnienia. W mojej ocenie na szczególne docenienie zasługują następujące osiągnięcia Doktoranta, które zrealizował ze dużym zaangażowaniem i dociekliwością badawczą:

- projekt i wykonanie złożonego stanowiska badawczego umożliwiającego ocenę zużycia ogniw łańcuchowych; przystosowanie rzeczywistego węzła tarcia do laboratoryjnych analiz modelowych z możliwością wykorzystania rozwiązania (stanowiska) w praktyce przemysłowej,
- realizacja wieloetapowego, czasochłonnego eksperymentu z analizą wyników nie tylko głównego kryterium (zużycie ogniw łańcuchów), ale także innych skutków procesu zużywania (zmiana struktury i właściwości badanego materiału w obszarze śladu zużycia),
- kompleksowy opis elementarnych oddziaływań i interakcji w procesie zużywania ogniw łańcuchowych zweryfikowany doświadczalnie; skuteczne połączenie teoretycznych analiz obliczeniowych z fizyczną interpretacją skutków procesu zużywania.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Mateusza Wójcickiego nt. **„Identyfikacja synergizmu oddziaływania czynników środowiska kopalnianego w aspekcie ograniczenia zużycia ogniów łańcuchowych przenośników zgrzeblowych”**, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dn. 30 sierpnia 2018 r. (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

Podpisał Arkadiusz Stachowiak