

Koszalin, dnia 10.10.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
ul. Raławicka 15/17
75-620 Koszalin

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Klaudia OLEJNICZAK**

pt.: „*Wykorzystanie rzeczywistej powierzchni tarcia do prognozowania zużywania się elementów roboczych w glebowej masie ścierniej*”

Promotor rozprawy doktorskiej: **dr hab. inż. Aleksandr VRUBLEVSKYI prof. UMM**

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: **Dr inż. Jarosław Krzysztof GONERA**

Podstawa opracowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie Pana Prof. dr hab. inż. Adama Lipińskiego.

1. Przedmiot recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK, o łącznej objętości 170 stron, składa się z 7 rozdziałów i zawiera 61 rysunków i 26 tabel. Ponadto, na początku rozprawy zamieszczono *Streszczenie i Summary oraz Wykaz ważniejszych oznaczeń i Słownik podstawowych pojęć*, a w końcowej części pracy Bibliografię i normy, *Spis tabel, Spis rysunków i Aneks. Spis literatury* jest obszerny i obejmuje aż 257 pozycji (w tym 204 obcojęzycznych) wśród których są publikacje źródłowe, książki, monografie, rozprawy, artykuły opublikowane w czasopiśmie naukowych i naukowo-technicznych, referaty zamieszczone w materiałach konferencyjnych oraz 4 normy. W spisie literatury są dwie współautorskie publikacje z udziałem Doktorantki w czasopiśmie *Materials* (2021) (140 pkt. MNiSW) i *Eksplotacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability* (2022) (140 pkt. MNiSW).

2. Tematyka rozprawy

Jednym z ważnych problemów w inżynierii mechanicznej jest zapewnienie odpowiedniej trwałości i odporności elementów roboczych maszyn, w szczególności do uprawy gleby, czyli pracujących w bardzo trudnych warunkach. Pomimo prowadzenia intensywnych badań w wielu ośrodkach naukowych problem ten jest ważny i nadal nierozwiązany, szczególnie dotyczy to zużycia elementów roboczych o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych. Podczas pracy maszyny uprawowej, w wyniku oddziaływania glebowej masy ścierniej następuje intensywne i nierównomierne zużycie elementów roboczych a głównie ich krawędzi. Prowadzi to do konieczności wymiany lub regeneracji zużytych elementów roboczych, powodując wzrost kosztów oraz czasu przestojów maszyn.

Tematyka rozprawy dotyczy bardzo złożonych zagadnień zużywania się elementów roboczych do uprawy gleby stosowanych w narzędziach i maszynach rolniczych, w wyniku

oddziaływania glebowej masy ścierniej, prognozowania zużycia przy pomocy nowoczesnych metod oraz sposobów zabezpieczania obszarów najbardziej narażonych na zużycie.

Celem pracy było opracowanie metody do prognozowania zużycia elementów roboczych w glebowej masie ścierniej z wykorzystaniem rzeczywistej powierzchni tarcia.

Dotychczas, pomimo istnienia różnych modeli do prognozowania zużycia elementów roboczych nie opracowano jeszcze metodyki, która uwzględni wszystkie czynniki, które istotnie wpływają na proces zużycia. Powszechnie stosowanym modelem do wyznaczenia zużycia objętościowego materiału jest model Archarda, w którym pomijane są zróżnicowane właściwości materiału (m. in. gęstość), które wpływają na przebieg zużycia. Dlatego, Doktorantka bardzo dobrze do modelowania procesu zużycia stosuje metodę elementów dyskretnych (DEM) oraz metodę skanowania 3D do lokalizacji rzeczywistych obszarów zużycia.

Zatem rozprawa doktorska mgr inż. Klaudii OLEJNICZAK dotyczy bardzo aktualnych zagadnień technicznych, w których występują złożone, o stochastycznym charakterze zjawiska zużycia elementów roboczych maszyn do uprawy gleby, a ich wyjaśnienie na drodze analizy teoretycznej, ze względu na bardzo dużą liczbę czynników, jest obecnie niemożliwe. Konieczne jest zatem podejmowanie bardzo złożonych i kompleksowych prac badawczych, których efektem będzie prawidłowe wyznaczenie miejsca lokalnego zużycia elementu roboczego oraz określenie stref o największej intensywności.

W tym aspekcie rozprawa doktorska ma charakter nowatorski. Sposób prezentacji pracy jest bardzo oryginalny i ciekawy co wynika już ze spisu treści. O ważności tematyki podjętej w rozprawie świadczą liczne publikacje i prace badawcze nad procesem zużycia elementów roboczych prowadzone w wielu ośrodkach naukowych w kraju i na świecie.

Uważam, że wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK, ma duże znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne i jest w pełni uzasadniony.

3. Cele, hipotezy i zakres rozprawy

Podstawowym celem rozprawy mgr inż. Klaudii OLEJNICZAK jest: „opracowanie metody do prognozowania zużycia elementów roboczych w glebowej masie ścierniej z wykorzystaniem rzeczywistej powierzchni tarcia”.

Do realizacji założonego celu sformułowano trzy następujące hipotezy badawcze:

Hipoteza 1: „Do prognozowania zużycia w glebowej masie ścierniej można wykorzystać rzeczywistą powierzchnię tarcia uzyskaną za pomocą metody skanowania 3D”.

Hipoteza 2: „Do zlokalizowania zużycia dla materiałów o różnych właściwościach można wykorzystać model numeryczny rzeczywistej powierzchni tarcia, który umożliwi uzyskanie oryginalnych charakterystyk zużycia objętościowego”.

Hipoteza 3: „Na podstawie modelowania interakcji elementu roboczego z glebą wykorzystując model Hertza–Mindlina można uzyskać charakterystykę zużycia”.

Do treści hipotez nasuwają się drobne uwagi, gdyż sformułowano je w trybie twierdzącym, który zwyczajowo stosowany jest w tezach, natomiast w hipotezach powinno się stosować tryb przypuszczający. Ponadto hipotezy są sformułowane nieściśle, gdyż **zużywa się wierzchnia elementu roboczego wykonanego z określonego materiału** a nie materiał. W

dalszej części rozprawy Autorka precyzyjnie i poprawnie definiuje (np. pkt. 2.1, 6 wg), że „*Zużywanie nazywane jest procesem zmian, które zachodzą w warstwie wierzchniej (skrót: WW) ciała stałego*”.

Na przykład w hipotezie 1 nie wskazano jakiej części dotyczy zużycie. Poprawniej powinno być: *Należy przypuszczać, że do prognozowania zużycia elementu roboczego w glebowej masie ścierniej można wykorzystać rzeczywiste strefy tarcia zlokalizowane za pomocą metody skanowania 3D. Również hipoteza druga według mnie mogła być lepiej sformułowana np.: Można się spodziewać, że do zlokalizowania stref zużycia elementów roboczych wykonanych z materiałów o różnych właściwościach można wykorzystać model numeryczny rzeczywistych obszarów tarcia, który umożliwi uzyskanie oryginalnych charakterystyk zużycia objętościowego.*

Należy zaznaczyć, że te drobne uwagi dotyczą jedynie strony formalnej, natomiast nie stanowią zarzutu w sensie merytorycznym.

W celu sprawdzenia poprawności sformułowanych hipotez opracowano również obszerny zakres rozprawy obejmujący:

1. Analiza stanu zagadnienia (zużywanie elementów roboczych wykonanych z różnych materiałów, metody oceny zużycia elementów roboczych w ścierniej masie glebowej.)
2. Przegląd modeli do prognozowania zużycia elementów roboczych w glebie.
3. Dobór obiektów badań.
4. Realizacja badań w warunkach laboratoryjnych oraz naturalnych.
5. Opracowanie wyników na podstawie badań tribologicznych.
6. Uzyskanie rzeczywistych obszarów tarcia oraz opracowanie nowych charakterystyk zużycia z wykorzystaniem metody skanowania 3D.
7. Ocena obszarów tarcia elementów roboczych wykonanych z badanych materiałów.
8. Modelowanie elementów roboczych w interakcji z masą glebową na podstawie wykorzystania zasad mikromechaniki.

Moim zdaniem cel i hipotezy zostały sformułowane w zasadzie (poza drobnymi uwagami) prawidłowo, natomiast zakres rozprawy został określony i przedstawiony właściwie. Na szczególne podkreślenie zasługuje jasna pod względem metodologicznym koncepcja rozprawy, która obejmuje szeroki zakres badań eksperymentalnych obejmujący najpierw wykonanie bardzo szczegółowej analizy stanu zagadnienia, następnie sprecyzowanie problemów badawczych, opracowanie lub adaptacja metodyk badawczych, budowa stanowisk badawczych i przygotowanie próbek, opracowanie planu eksperymentu, wykonanie badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych, skanowanie 3D elementów roboczych w strefach zużycia, wykonanie symulacji numerycznych metodą elementów dyskretnych, a następnie przeprowadzenie analizy statystycznej otrzymanych wyników oraz wyciągnięcie właściwych wniosków.

4. Merytoryczna ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK obejmuje siedem rozdziałów. Poprzedzona jest spisem treści i wykazem ważniejszych oznaczeń i podstawowych pojęć. Według mnie struktura podziału treści rozprawy na rozdziały i podrozdziały jest prawidłowa.

W rozdziale pierwszym *Wprowadzenie* Doktorantka prawidłowo przedstawia w sposób ogólny problematykę rozprawy dotyczącą zużywania się elementów roboczych maszyn do

uprawy gleby i metod prognozowania ich zużycia oraz uzasadnia konieczność realizacji rozprawy.

Rozdział drugi *Analiza stanu zagadnienia* jest obszerny, gdyż obejmuje łącznie aż 59 stron co stanowi ponad 34% objętości całej pracy. Pomimo tego, rozdział ten zasługuje na wyróżnienie ze względu na to, że analiza jest bardzo wnikliwa i szczegółowa oraz obejmuje bardzo ważne i skomplikowane zagadnienia dotyczące: *Zużywania elementów roboczych* (pkt. 2.1), *Zużywanie w glebowej masie ścierniej* (pkt. 2.2), *Metody zwiększania odporności na zużycie elementów roboczych* (pkt. 2.3), *Modele w prognozowaniu zużycia* (pkt. 2.4), *Modelowanie materiału ściernego metodą elementów dyskretnych* (pkt. 2.5), *Wykorzystanie metody skanowania 3D w tribologii* (pkt. 2.6) i *Podsumowanie analizy literatury* (pkt. 2.7). Autorka najpierw precyzyjnie analizuje różne sposoby klasyfikacji procesów zużywania się elementów roboczych wykonanych z materiałów inżynierskich, a następnie wyjaśnia przyczyny ich powstawania oraz częstotliwość występowania w praktyce. Wnikliwie opisuje również różne zjawiska występujące w strefach tarcia, które wpływają na intensywność zużycia ściernego elementów roboczych. Dalej definiuje warstwę wierzchnią ciała stałego oraz wyjaśnia jej budowę strefową i istotny wpływ na trwałość i niezawodność obiektu technicznego. Wskazuje również na dwa rodzaje warstwy wierzchniej – technologiczną i eksploatacyjną oraz na odpowiedni dobór właściwości WW w zależności od warunków eksploatacji części i występujących rodzajów zużycia. Autorka słusznie stwierdza, że kształtując warstwę wierzchnią elementów roboczych o odpowiednich właściwościach możliwe jest podwyższenie trwałości narzędzi i zmniejszenie ubytków materiałowych podczas zużycia ściernego w trakcie eksploatacji. Dalej Autorka obszernie charakteryzuje glebę jako masę ścierną wyróżniając kilka czynników takich jak: geometria ziarna ściernego, zwięzłość gleby, twardość, odczyn, wilgotność, porowatość gleby, które istotnie wpływają na intensywność zużywania się elementów roboczych w masie glebowej. Opisuje różne sposoby klasyfikacji i charakterystyki geometrii cząstek ściernych oraz wpływ wielkości cząstek, zwięzłości gleby, kwasowości, wilgotności i porowatości na intensywność zużycia elementów roboczych. W zależności od właściwości fizyko-mechanicznych gleby wyróżniono 13 elementarnych zjawisk zużywania się elementów roboczych w glebie oraz 4 sposoby zużywania ściernego: bruzdowanie, mikroskrawanie, mikrozmęczenie, rysowanie i mikropeknięcie, a także klasyfikację różnych rodzajów zużywania ściernego w zależności od ilorazu powierzchni wypływek materiału do powierzchni bruzdy. W dalszej części Autorka analizuje wyniki badań dotyczących sił, zarówno poziomych jak i pionowych, działających na element roboczy podczas pracy, w zależności od geometrii narzędzia, głębokości i prędkości roboczej. Zagadnienie doboru geometrii narzędzia jest bardzo istotne ze względu na konieczność zapewnienia zamierzonego efektu agrotechnicznego, który uzyskiwany jest przy możliwie minimalnej energochłonności procesu. Ważnym zagadnieniem ze względu na tematykę rozprawy jest analiza metod zwiększania odporności elementów roboczych na zużycie. W tym aspekcie Doktorantka prawidłowo dokonała wnikliwej analizy różnych czynników tribosystemu „element roboczy – gleba” i ich wpływu na odporność na zużycie. Analizą objęto następujące zagadnienia: *Zastosowanie stali odpornych na zużycie ścierne*, *Zastosowanie wielofazowych warstw napawanych* oraz *Zastosowanie materiałów spiekanych*, wykazując że, zwiększenie trwałości oraz odporności na zużycie elementów roboczych w 90% przypadków osiąga się metodami technologicznymi. Zatem dobór materiałów przeznaczonych do stosowania na elementy robocze eksploatowane w środowisku ściernym jest istotny ze względu na ich skład chemiczny, mikrostrukturę, sposób nakładania, technologię wytwarzania oraz przebieg zużywania. Odporność elementów roboczych na zużycie można zwiększyć przez stosowanie odpowiednich gatunków stali, węglików czy warstw napawanych.

Kolejnym, ważnym zagadnieniem analizowanym w przeglądzie literatury jest modelowanie procesu zużycia elementów roboczych. Przedstawiono różne modele, opracowane

na podstawie badań eksperymentalnych, mechanice kontaktu oraz mechanizmach zużycia, poczynając od równania Amontona, Reye, Archarda, Kragielskiego, Napiórkowskiego i Michalskiego oraz Owsiaka, Konstenckiego, aż do metod symulacji komputerowej w których zastosowano metodę elementu skończonego. Metody te pozwalają określić zużycie objętościowe elementów roboczych w dowolnym miejscu oraz określić obszary kontaktu narzędzia z glebą i intensywność zużycia, które są istotne ze względu na możliwość przewidywania skutków zużycia i zwiększenia odporności na zużycie metodami technologicznymi. W konkluzji Doktorantka stwierdza, że pomimo licznych prac nadal brakuje kompleksowego modelu opisującego proces zużywania elementów roboczych głównie o zróżnicowanych właściwościach, z uwzględnieniem stochastycznych zjawisk występujących w tym procesie.

Dalej opisano modelowanie procesów zużywania elementów w glebie metodą elementów dyskretnych (DEM). Przedstawiono rodzaje modeli do symulacji procesów w glebie, sposób obliczania składowych sił tarcia oraz modele zużycia Archarda i Oka a także podstawy teoretyczne metody DEM.

Innym ważnym problemem jest wykorzystanie metody skanowania 3D elementów roboczych w tribologii. Autorka opisuje różne metody określania zużycia podkreślając zalety modeli trójwymiarowych za pomocą, których można określić zarówno uogólnione jak i lokalne charakterystyki zużycia elementu roboczego, które pozwalają określić miejsca wzmocnienia zwiększającego odporność na zużycie ściernie.

W podsumowaniu tego rozdziału Autorka formułuje bardzo ważne wnioski. Na podstawie analizy literatury dotyczącej najważniejszych aspektów dotyczących zużywania elementów roboczych w glebowej masie ścierniej, metod zwiększania odporności elementów roboczych na zużycie, modeli wykorzystywanych do prognozowania zużycia ściernego oraz zastosowania nowoczesnych technik inżynierskich do rozwiązywania problemów w tribologii, Autorka słusznie przedstawiła propozycję rozwiązania zadania zużycia elementów metodą elementów dyskretnych uzupełnioną o metodę skanowania 3D ze względu na skomplikowany charakter występujących zjawisk i ich losowy charakter. Doktorantka sformułowała również następujący problem naukowy: „Czy istnieje możliwość wykorzystania rzeczywistej powierzchni tarcia do prognozowania zużywania elementów roboczych w glebowej masie ścierniej?” a także zdefiniowała cel, hipotezy i zakres badań własnych.

Podjęta przez Doktorantkę tematyka badawcza jest skomplikowana, aktualna i ważna zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Procesy zużywania się elementów roboczych, które są stochastyczne o zmiennej intensywności, w glebowej masie ścierniej nie są jeszcze dostatecznie zbadane. Również brakuje opracowań dotyczących prognozowania trwałości elementów roboczych z uwzględnieniem rzeczywistych warunków ich eksploatacji.

Temat, cel i zakres rozprawy stanowiący rozdział trzeci został już opisany w pkt. 3 Recenzji.

W rozdziale czwartym *Metodyka badań* obejmującym 24 strony najpierw prawidłowo opisano unikatową aparaturę pomiarową, którą zastosowano do badań mikrostruktury, mikrotwardości oraz do analizy składu chemicznego. Analizę statystyczną wyników badań wykonano bardzo dobrze za pomocą komercyjnego programu STATISTICA 13.3. Dalej przedstawiono obiekt badań, którym były próbki stalowe o różnej geometrii, wykonane ze stali 38GSA, 38GSA z warstwą napawaną elektrodą otuloną EL-HARD70 oraz ze stali 38GSA z dolutowaną płytką z węglików spiekanych. Badania realizowano w kilku etapach, które bardzo czytelnie przedstawiono na schemacie rysunkowym. Na wyróżnienie zasługuje bardzo dokładny opis wykonanych badań oraz metodyki określenia zużycia objętościowego z uwzględnieniem zróżnicowanej gęstości narzędzia wykonanego z różnych materiałów oraz opracowanie wzorów

do obliczenia siły normalnej. Dalej opisano eksperyment tribologiczny przeprowadzony w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych. Eksperyment laboratoryjny przeprowadzono na stanowisku badawczym o nazwie „wirująca misa”, która służyła do oceny zużycia w glebowej masie ścierniej. Dzięki zastosowaniu następujących rozwiązań: regulacja prędkości oscylacji, regulacja prędkości obrotowej, możliwość dogniatania i spulchniania masy ścierniej oraz zastosowanie systemu jej nawilżania i pomiaru wilgotności, możliwa była identyfikacja parametrów, które są związane z procesem zużycia narzędzia. Eksperyment tribologiczny zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i rzeczywistych przeprowadzono dla dwóch rodzajów gleb: glinie piaszczystej oraz piasku gliniastym. Podczas wykonywania eksperymentu w warunkach rzeczywistych próbki mocowane były na 9-zębowym kultywatorze z zębami sprężystymi, agregowanym z ciągnikiem rolniczym. Badanie zużycia próbek odbywało się podczas pracy kultywatora na głębokości 0,12 m. Średnia prędkość agregatu wynosiła $v=1,9$ m/s, natomiast droga tarcia $S=10000$ m.

Ważnym zagadnieniem wstępującym podczas modelowania interakcji elementu roboczego z glebą jest opracowanie modelu materiału ściernego (gleby). W tym celu Doktorantka bardzo dobrze zastosowała metodę elementów dyskretnych (DEM), w środowisku EDEM wykorzystując model kontaktu Hertza–Mindlina do modelowania materiału ściernego. Opracowano bibliotekę materiału ściernego wyróżniając 4 kształty oraz 2 rozmiary dla kulistych cząstek gleby. W modelach numerycznych rzeczywiste cząstki gleby modelowano elementarnymi powierzchniami kulistymi, które wykazały bardzo dobre odwzorowanie masy cząstek. Kalibracji modelu dokonano na podstawie pomiaru kąta naturalnego usypu mierząc średnicę i wysokość usypanego stożka, otrzymanych eksperymentalnie i numerycznie przy pomocy opracowanej aplikacji. Przeprowadzono również analizę błędów popełnianego podczas skanowania powierzchni 3D wykazując, że najmniejsze błędy występują dla obiektów nieodbijających światła skanera.

Ten rozdział oceniam wysoko ze względu na staranny opis stanowisk badawczych i badanych narzędzi oraz na opracowanie adekwatnej metodyki badań do opracowania wymaganych charakterystyk zużycia i podstaw do przewidywania zużycia z wykorzystaniem rzeczywistej powierzchni tarcia elementu roboczego.

Kolejny rozdział piąty *Wyniki i dyskusja* zawierający 24 strony, w którym najpierw dokonano oceny powierzchni elementów roboczych wykonanych z odpowiednich materiałów w celu identyfikacji sposobów ich zużywania w eksperymencie tribologicznym. Stwierdzono, że niezależnie od rodzaju przeprowadzonego eksperymentu, główną przyczyną zużycia narzędzia są sposoby mechaniczne tj.: rysowanie, brzdowanie i powierzchniowe zużycie zmęczeniowe warstwy wierzchniej. Dalej szczegółowo opisano analizę zużycia narzędzia w warunkach rzeczywistych. Skanowanie 3D powierzchni narzędzia przeprowadzono sześć razy co 10000 m, na drodze $S=60000$ m, zgodnie z przyjętą metodyką. Otrzymano bardzo wartościowe wyniki badań w postaci modeli numerycznych oraz stwierdzono, że: „rzeczywiste powierzchnie skanowane różnią się od próbki nominalnej w zależności od rodzaju masy ścierniej, w której były użytkowane” oraz „na materiale badawczym nie zaobserwowano zużycia powierzchni bocznych, co jest skutkiem przyjętych warunków eksperymentu”.

Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy zmian masy i objętości stwierdzono, że objętość zużytego narzędzia zależy od rodzaju gleby i wykazano, że objętość zużycia Q zarówno w przypadku gleby ciężkiej jak i lekkiej jest liniową zależnością względem drogi tarcia S oraz opracowano równania regresji opisujące zależność średniego zużycia objętościowego od drogi tarcia w zakresie od 10000 do 60000 m. Opracowano również korelację pomiędzy średnim zużyciem masowym i średnią objętością zużycia, w glebie lekkiej i ciężkiej. Wykazano również, że zastosowanie metody objętościowej do analizy ilościowej zużycia elementów roboczych na

całej drodze tarcia [0; 60000] m jest prawidłowe, gdyż obliczone na tej podstawie wartości zużycia masowego wykazały nieistotność różnic w stosunku do metod wagowych. Dalej obliczono wartość stałej W zużycia w modelu zużycia Archarda oraz wykazano, że większe różnice wartości stałej W na drodze tarcia występują dla gleby ciężkiej, przy czym wartość rośnie od $W=9,95 \cdot 10^{-11}$ (dla $S=10000$ m) do $W=2,46 \cdot 10^{-10}$ czyli przyrost wynosi $\Delta W=1,465 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$. W przypadku gleby lekkiej przyrost wynosi zaledwie $\Delta W=0,05 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$.

Szczegółową analizą objęto również zużycie narzędzia w obszarach rzeczywistego kontaktu z glebą w warunkach naturalnych, wykazując zgodność otrzymanych wyników z danymi literaturowymi, przy czym odporność na zużycie ściernie zależy przede wszystkim od składu chemicznego materiału, twardości narzędzia oraz właściwości środowiska ściernego. Stwierdzono prawidłowo, że najmniejsze zużycie wynosi dla próbki wzmocnionej węglikiem spiekany G10 w glebie lekkiej, której wartość zużycia była ponad 2 razy mniejsza w porównaniu z próbką wzmocnioną napoiną EL-HARD70 oraz trzy razy mniejsze od próbki ze stali 38GSA. Otrzymano również bardzo wartościowe wyniki pozwalające opracować charakterystyki zużycia objętościowego $K_v(x)$ w dowolnej odległości od powierzchni czołowej, w zależności od rodzaju materiału narzędzia i technologii jego wzmocnienia, a także określić drogę tarcia S , przy której następuje całkowite zużycie elementarnej części próbki ΔQ_{ni} oraz wyznaczyć dane niezbędne do obliczenia stałych w modelu zużycia Archarda.

Przeprowadzono również szczegółową analizę rzeczywistych obszarów tarcia gleby lekkiej i ciężkiej o narzędzie podczas badań w warunkach laboratoryjnych oraz rzeczywistych w celu wyznaczenia trzech stref zużycia próbek (strefę początkowego zużycia, strefę przejściową i strefę największego zużycia) w rzeczywistych obszarach tarcia (kontaktu z glebą). Te strefy wyznaczono w zależności od kąta atakującego zmieniającego się w zakresie $\gamma=0^\circ \div 25^\circ$.

Pomimo, że wszystkie wyniki są bardzo starannie opisane i udokumentowane to można dostrzec pewne niedociągnięcia. Na przykład opracowane równania $Q=Q(S)$ prawidłowo opisują zużycie objętościowe w podanym zakresie drogi tarcia $S \in [10000; 60000]$ m, to pewien niedosyt budzi brak opracowanego obszaru ufności dla tych funkcji oraz brak rozszerzenia tych funkcji na zakres od 0 do 10000 m. Na podstawie opracowanych równań nie można tego dokonać poprzez zwykłą ekstrapolację, gdyż podstawiając do tych równań wartość $S=0$ m, zużycie objętościowe jest mniejsze od zera i wynosi odpowiednio $Q=-84,233 \text{ mm}^3$ dla gleby ciężkiej oraz $Q=-9,3427 \text{ mm}^3$ dla gleby lekkiej. Prawidłowe postacie funkcji, obowiązujące w przedziale od $S=0$ do $S=60000$ mm, powinny być odpowiednio: $Q=0,011797 \cdot S \text{ [mm}^3\text{]}$ dla gleby ciężkiej i $Q=0,00694 \cdot S \text{ [mm}^3\text{]}$ dla gleby lekkiej. Brak jest również równań regresji postaci: $Q=Q(Z_m)$.

W rozdziale szóstym *Prognozowanie zużycia na podstawie modelowania metodą elementów dyskretnych* obejmującym 10 stron najpierw opisano algorytm modelowania przemieszczenia glebowej masy ścierniej po powierzchni roboczej narzędzia metodą elementów dyskretnych w środowisku EDEM, z wykorzystaniem modelu kontaktu Hertza-Mindlina. Zastosowano również rzeczywiste obszary tarcia otrzymane na podstawie skanowania 3D i modele nominalne oraz następujące warunki modelowania: prędkość narzędzia $v=1,9$ m/s i droga tarcia $S=0,38$ m. Ponadto zastosowano dane dotyczące właściwości modelowanych materiałów z tabel 4.1 i 4.4. oraz wyznaczonych już stref zużycia zestawionych w tabeli 5.9. Zaimportowano również 6 modeli zawierających nominalne i rzeczywiste powierzchnie tarcia. Otrzymano bardzo wartościowe wyniki obliczeń numerycznych dotyczących rozkładu prędkości masy glebowej, wartości średniej siły normalnej zredukowanej do węzłów na powierzchni czołowej próbki a także wyznaczono wartości zużycia narzędzia modelem Oka dla próbek nominalnych oraz dla rzeczywistej powierzchni tarcia, wykazując również na znaczne różnice w przewidywaniu ich zużycia. Wykazano, że najwyższe wartości zużycia zlokalizowane są w części czołowej próbki 38GSA, natomiast dla próbki wzmocnionej węglikiem spiekany największe wartości zużycia występują w części poza wzmocnieniem. Na tej podstawie można

zlokalizować strefy najbardziej narażonych na zużycie ścierny, które powinny być wzmocnione aby zwiększyć trwałość oraz czas użytkowania elementu roboczego.

Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych Doktorantka proponuje zastosować do prognozowania zużycia narzędzia w glebowej masie ścierny. Na podstawie otrzymanych korelacji dodatniej i wysokiej współzależności (współczynnik korelacji liniowej Pearsona jest większy od 0,9) między wynikami zużycia otrzymanymi z eksperymentu i symulacji numerycznych Doktorantka stwierdza, że możliwe jest przewidywanie zużycia narzędzia metodami symulacyjnymi na podstawie opracowanej aplikacji w środowisku EDEM zarówno przy zastosowaniu modelu Archarda jak i Oka, zarówno w glebie ciężkiej jak i lekkiej.

Ze względu na otrzymane wyniki badań oraz możliwość prognozowania zużycia narzędzi metodami numerycznymi rozdział ten oceniam bardzo wysoko, ze względu na naukowe jak i aplikacyjne jego znaczenie.

Rozdział 7 zatytułowany *Podsumowanie i wnioski*, został opracowany prawidłowo. Wnioski końcowe podzielone na: rezultaty poznawcze, rezultaty praktyczne, kierunki dalszych badań i wnioski końcowe zostały przez Autorkę przedstawione w sposób metodyczny i wskazują, że cele pracy zostały osiągnięte, hipotezy zostały sprawdzone, zaś zakres pracy w pełni zrealizowany. Należy podkreślić, że w rozprawach doktorskich rzadko spotyka się informacje dotyczące wskazania kierunków dalszych badań.

Dokonując merytorycznej oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK stwierdzam, że w rozprawie tej podjęto próbę rozwiązania ważnego, złożonego i trudnego problemu naukowego mającego duże znaczenie praktyczne. Rozwiązanie zagadnienia dotyczącego prognozowania zużycia elementów roboczych w glebowej masie ścierny, w tym wykonanych z materiałów o zróżnicowanych właściwościach, prezentowane w rozprawie jest starannie przemyślane, wszechstronnie umotywowane i w pełni dojrzałe. Zastosowano nowatorskie rozwiązanie polegające na wykorzystaniu rzeczywistej powierzchni tarcia otrzymanej za pomocą precyzyjnego skanowania 3D oraz zastosowanie metody elementów dyskretnych w środowisku Altair EDEM™, które dotychczas nie były stosowane.

Według mnie zasługuje ono na wysoką ocenę i powinno zostać wyróżnione. Jestem pełen uznania dla podejścia Autorki do analizowanych w rozprawie zagadnień. Uważam, że Doktorantka jest dobrze przygotowana do podjęcia dalszej samodzielnej pracy naukowej i badawczej. Wyrażam przekonanie, że rozprawa doktorska mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK wnosi istotny wkład naukowy w **dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna**.

5. Uwagi szczegółowe do rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK jest napisana w sposób jasny, zwarty i uporządkowany. Struktura i układ pracy, a także jej strona edytorska są właściwe i sprzyjają zrozumieniu przez czytelnika treści poszczególnych rozdziałów. Oceniam, że rozprawa jest napisana bardzo dobrze zarówno pod względem merytorycznym, jak i językowym. Wszystkie wykonane badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne są bardzo dobrze opisane a otrzymane wyniki są wyczerpująco udokumentowane. Mimo to w tekście rozprawy zdarzają się – na szczęście bardzo nieliczne – drobne pomyłki edytorskie tzw. literówki oraz sformułowania wywołujące wątpliwości. Dla przykładu:

- 1) W pracy występuje szereg drobnych błędów edytorskich tzw. brak spacji, np. str. 79, 5wd oraz literówek, np. str. 20, jest „głównie“ powinno być „głównie“; str. 45, 2 wg w wyrazie „prze” na końcu brakuje litery „z”; 46 16 wd jest „a” zamiast „ą”; 48, 17 wd jest „światowcy” zamiast „światowych”; 51 9wg jest „o” zamiast „ó”; str. 55, 5 wg, „Ze względu, iż..” brakuje „na to”; str. 60 7 wg jest „e” zamiast „a”; 62 5wd w wyrazie „na” brakuje „a”;

str. 63 5 wg zamiast „warunku” powinno być „warunki”; str. 65, 6wg jest „Metodę” zamiast „Metoda”; 13 wd jest „modelowanie” zamiast „modelowania”; na str. 73, 7 wd, w wyrazie „eksperymentalny” brakuje litery „m” na końcu. Te drobne uchybienia przekazałem Doktorantce.

2) Czasami wprowadzono nieściśle określenia, np.:

- str. 20, 4 wd jest“zużycie przez mkroskrawanie i odkształcenia plastyczne sprężyste tworzywa konstrukcyjnego“. Jest to określone nieprecyzyjnie, gdyż z założenia odkształcenia sprężyste nie są przyczyną zużycia, gdyż są odwracalne. Natomiast przyczyną zużycia są odkształcenia plastyczne, które są trwałe (nieodwracalne). Przy czym, najpierw następuje odkształcenie sprężyste, które przy dalszym obciążeniu przechodzi w odkształcenie plastyczne, a ściślej termo-lepko-plastyczne, gdyż odkształcenie plastyczne zachodzi z określoną prędkością odkształcenia i przy podwyższonej temperaturze;
- str. 30, „Sposoby zużywania w glebowej masie ścierniej“; poprawniej jest „Sposoby zużywania elementów roboczych w glebowej masie ścierniej“;
- str. 52 13wd „chropowatość wynosi poniżej 0,1 μm ”; należało podać o jaki parametr chropowatości chodzi, np. powinno być chropowatość powierzchni według parametru $R_a=0,1 \mu\text{m}$;
- str. 62 11wd jest „pole nacisku styku”; powinno być np. „pole obszaru nacisków kontaktowych”;
- str. 69, wzór (2.28) według mnie jest opisany nieprecyzyjnie, gdyż zamiast wyrażenia d^2v/dt^2 powinno być $d^2\delta/dt^2$; oraz zamiast dv/dt powinno być $d\delta/dt$, oraz obciążenia siłowe F_d i F_e powinny być po prawej stronie równania ruchu; ponadto nie podano czy to równanie dotyczy obiektu dyskretnego czy ciągłego;
- str. 71 5wg w opisie wzoru jest niezrozumiały opis wyrażenia $(1+H(1-\sin(\gamma)))^{2,4H^{0,94}}$ jako zachowanie podczas uderzenia;
- str. 73 4 wg „stosunkiem zużytego elementu do objętości nominalnej”; powinno być np. „stosunkiem objętości zużytego elementu do objętości nominalnej”;
- rys. 4.3 „martenzytu odpuszczania” zamiast „martenzytu odpuszczonego”;
- str. 103 2wg, 15 wg i 2wd użyto sformułowania „powierzchnia materiału” poprawniej powinno być „powierzchnia narzędzia wykonanego z materiału”;
- str. 105, pkt. 5.2 „Analiza zużycia rzeczywistej powierzchni tarcia” takie sformułowanie jest nieprecyzyjne i niezrozumiałe, gdyż nie zużywa się powierzchnia tylko narzędzie (jego warstwa wierzchnia) wykonane z określonego materiału w obszarach tarcia o głębę;
- str. 110 rys. 5.6 i 5.7 używa się określenia „długość próbki w zakresie 0-35 mm” chodziło raczej o odległość od powierzchni tylnej próbki; ponadto równania regresji są zapisane nieczytelnie; również na str. 114, 115, 116, 118 używa się określenia „długość próbki”;
- str. 112 12wd „Różnica wartości wynosi $1,05 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ ”, powinno być $1,465 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$;
- pkt. 5.4, str. 120-127 używa się określenia „kąt atakujący”; według mnie powinno się przyjąć nomenklaturę stosowaną w teorii skrawania, czyli kąt natarcia γ , a także pozostałe kąty jako kąt ostrza β i kąt przyłożenia α .

3) Niektóre zdania są sformułowane niestylistycznie np.:

- str. 30, 9 wd „W glebowej masie ścierniej następuje do zużywania poprzez luźne cząstki ścierniwa uderzające o powierzchnie elementu roboczego, a także umocnione ziarna w zależności od stanu gleby”;
 - str. 39 16wd „Kąt montażu lemiesza wynosi w przekroju 43° , prostopadle do dołu i przechodzi w pierwszym otworze, na pięcie 23° ”;
 - str. 53 10wg „Dodanie azotu w postaci TiN lub Ti(C, N) do węglików TiC–Mo₂C–Ni doprowadziło do powstania pierwszych cermetali o zwiększonej wydajności dla dużych prędkości skrawania do obróbki końcowej [87]”;
 - str. 54 2wg „Podczas badań potwierdzono wysoką odporność na zużycie węglika krzemu na wiązaniu azotowym w glebie lekkiej i średniej przede wszystkim w odniesieniu do stali powszechnie stosowanych na elementy obrabiające glebę, dla tych warunków węgiel krzemu może zastąpić stale”;
 - str. 61 9wg „Napiórkowski i Michalski [147] oraz Owskiak [161] opisali zużywanie elementów roboczych obrabiających glebę w modelu uwzględniającym czynniki, które wpływają na zużycie”;
- 4) W wielu przypadkach zamiast operatorów matematycznych stosowano litery, np. zamiast znaku mnożenia „ \times ” stosowano literę „x” (rys. 4.3, rys. 4.4, rys. 5.6 i 5,7).

Warto zaznaczyć, że powyższe wątpliwości mają charakter dyskusyjny i porządkowy natomiast w żadnym stopniu nie umniejszają wysokiej wartości rozprawy. Mogą być bardzo łatwo poprawione oraz wykorzystane przez Autorkę w dalszych badaniach i publikacjach.

6. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK dotyczy rozwiązania skomplikowanego problemu o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym. Sposób rozwiązania tego problemu zaproponowany w rozprawie świadczy o szerokiej interdyscyplinarnej wiedzy Autorki rozprawy i umiejętności samodzielnego podejmowania złożonych zadań naukowych i badawczych.

Do wybranych najważniejszych osiągnięć Doktorantki zaliczam między innymi:

- 1) Wykorzystanie rzeczywistej powierzchni tarcia do modelowania zużycia z wykorzystaniem modelu kontaktu Hertza–Mindlina na podstawie modelu Archarda i Oka. Podejście to zrealizowano metodą elementów dyskretnych oraz metodą skanowania 3D.
- 2) Opracowanie nowych charakterystyk zużycia objętościowego poprzez analizę rzeczywistej powierzchni tarcia oraz zastosowanie proponowanych metod dyskretyzacji, dekompozycji i strefowania na podstawie kąta atakującego.

Po analizie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK nt. „Wykorzystanie rzeczywistej powierzchni tarcia do prognozowania zużywania się elementów roboczych w glebowej masie ścierniej” z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie złożonego problemu naukowego, stanowiący istotny wkład w rozwój dyscypliny *Inżynieria mechaniczna*. Rozprawa ta spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w *Ustawie*. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Klaudii OLEJNICZAK do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę szeroki zakres rozprawy i wysoki poziom rozwiązania analizowanych zagadnień, oryginalność proponowanej metodyki prognozowania zużycia

narzędzi do uprawy gleby oraz wyciągnięcie wartościowych wniosków a także opublikowanie wyników badań w sześciu artykułach naukowych (łącznie liczba punktów wynosi 530) w czasopiśmie indeksowanym o wysokim impact factorze **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**



Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka