

Dr hab. inż. Jacek Łubiński, Prof. PG
Doktor habilitowany nauk technicznych w zakresie
mechaniki i budowy maszyn
Doktor nauk technicznych w zakresie
mechaniki i budowy maszyn
Profesor uczelni Politechniki Gdańskiej w Gdańsku

Gdańsk, 26 czerwca 2023 r.

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytutu Mechaniki i Konstrukcji Maszyn
ul. G.Narutowicza 11/12,
80-233 Gdańsk

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Mariusza Opałki
pt. „ Analiza procesu tarcia par metal – polimer podczas rozruchu”
pod kierunkiem dr hab. Inż. Piotra Kowalewskiego

1. OPINIA OGÓLNA

Rozprawa doktorska Pana Magistra Mariusza Opałki, którą otrzymałem do recenzji z pewnością zasługuje na ocenę zdecydowanie pozytywną. Zrealizowane przez Autora zadania tworzą spójną, sensowną całość, odnoszącą się do ważnych i aktualnych zagadnień związanych ze stanami przejściowymi między spoczynkiem, a ruchem ślizgowym, prostoliniowym, w skojarzeniach konforemnych, płaskich z udziałem tworzyw polimerowych. Co istotne, jedną z głównych kwestii podjętych w pracy jest wpływu odkształcalności ciał w kontakcie ślizgowym na przebieg przejścia układu od spoczynku do ślizgania. Jest to, ważne, zarówno z punktu widzenia tribologii doświadczalnej, jak i praktycznych realizacji skojarzeń ślizgowych w technice. Podjęta tematyka wpisuje się w nieustająco aktualne w dziedzinie kwestie interakcji między kontaktem ślizgowym i właściwościami fizycznymi systemu otaczającego ten kontakt, co jest szczególnie zauważalne w stanach nieustalonych. Na wyrazy uznania zasługuje podjęta z sukcesem próba jakościowego i ilościowego opisu tych interakcji, co w niniejszej pracy pozwoliło na uzyskanie bardzo przydatnych rezultatów.

2. OCENA MERYTORYCZNA

W niniejszej recenzji przedstawiony jest przegląd przedmiotowej pracy z uwagami o charakterze ogólnym i pytaniami merytorycznymi, mającymi przyczynić się do podjęcia dyskusji o wątkach zasługujących w mojej opinii na uwagę w dalszej pracy Autora.

2.1. Istotność zagadnień wybranych jako tematyka pracy

W tribologii od początku jej istnienia, nawet przed jednoznacznym wyłonieniem tej dziedziny jako osobnej części nauki przez prof. Josta, znane są problemy związane z powtarzalnością i odtwarzalnością eksperymentu. Do podstawowych trudności należy zaliczyć trudności z dokładnym i jednoznacznym wyznaczeniem tarcia, zarówno na drodze doświadczalnej, jak i teoretycznej, z powodu mnogości czynników i zjawisk składających się na makroskopowy efekt w postaci obserwowanego tarcia ślizgowego. Pośród czynników istotnych dla wyniku eksperymentu z tarcie ślizgowym z pewnością można wymienić wpływ otoczenia kontaktu ślizgowego (maszyny) na przebieg i skutki tarcia, ze względu na interakcję

miedzy strefą styku (powierzchniami trącymi) – a wszystkimi elementami uczestniczącymi w przenoszeniu obciążeń i wywieraniu wymuszeń. Omawiana praca jest próbą poznania takich interakcji, ze skupieniem akcentów na zagadnieniach interakcji między tarciami, kształtem strefy styku rzeczywistego, lokalnym rozkładem obciążeń, odkształcalnością ciał w trakcie fazy przejściowej i szeroko rozumianymi właściwościami tych ciał, np. podatnością na pełzanie. Taka kombinacja czynników czyni pracę ważną nie tylko ze względu na poszerzanie wiedzy na temat tarcia ślizgowego tworzyw polimerowych, ale również ze względu na rozwój nowoczesnej metodyki kompleksowego eksperymentu tribologicznego.

2.2. Metodyka badawcza

Pracę p. mgr Inż. Mariusza Opałki można najogólniej scharakteryzować jako mieszczącą się w nurcie tribologii doświadczalnej, z głównym akcentem położonym na nieustalone stany tarcia ślizgowego. Rozruch, czyli przejście od pełnego spoczynku w styku dwóch powierzchni płaskich do ślizgania rozwiniętego na całym obszarze kontaktu tych powierzchni to faza ruchu prawdopodobnie najtrudniejsza do jednoznacznego opisu teoretycznego i szczegółowej rejestracji w drodze eksperymentu laboratoryjnego. Podstawowe modele tego stanu przejściowego, stosowane po dziś dzień w technice datują się na XVII – XVIII wiek n.e., pomimo powszechnej świadomości ograniczeń takiego podejścia. Jednocześnie wiadomo o istotności przejścia od spoczynku do ruchu ślizgowego w maszynach, szczególnie przy niewielkich prędkościach ruchu względnego, chociażby z powodu ryzyka wzbudzenia uciążliwych drgań tarciovych.

Wziąwszy powyższe pod uwagę, należy zauważyć dużą staranność i kompleksowość podejścia do rozwiązania problemu badawczego przez Doktoranta. Przygotowania do realizacji pracy zostały zrealizowane zgodnie z wszelkimi zasadami sztuki; począwszy od drobiazgowego definiowania celu badawczego, w oparciu o dostępną wiedzę o materiałach, metodach badawczych i zrealizowanych wcześniej podobnych badaniach, poprzez formułowanie opartego o metody statystyczne planowania eksperymentu i modyfikacje stanowiska badawczego, aż po obróbkę i ocenę wyników badań doświadczalnych, postępowanie Autora wskazuje na bardzo dobre opanowanie warsztatu metodyki naukowej. Widoczna jest świadomość wielowątkowej specyfiki zadania eksperymentalnego, która narzuca konieczność identyfikacji właściwości materiałów w skojarzeniu, makroskopowej geometrii ciał tworzących parę ślizgową, parametrów więzów i wymuszeń, mikrogeometrii powierzchni kontaktowych itp.. Autor wykazał zastosować podejście kartezjańskie, rozdzielając badania doświadczalne na wzajemnie zależne etapy (opisane w rozdziałach od 4 do 6), wyróżniając oddzielne zadania badawcze zmierzające najpierw do rozpoznania kształtu i zasięgu powierzchni styku, następnie do głównej części obejmującej tarcie statyczne i przejście do kinetycznego, aby całość zamknąć dodatkowymi badaniami pełzania zastosowanych materiałów przy ściskaniu. Każdorazowo opracowane zostały założenia, plan eksperymentu i stosowny aparat matematyczny do obróbki danych i ekstrakcji interesujących charakterystyk badanych obiektów. Wszystkie zadania szczegółowe i ich wzajemne powiązania, oraz następstwo zostały zdefiniowane prawidłowo, co pozwoliło na uzyskanie wiarygodnych wyników.

Jako niewielki mankament opisu zrealizowanych prac można wskazać pewne luki w opisie niektórych technicznych szczegółów systemu, na którym fizycznie realizowano eksperymenty, co jednakże nie jest błędem krytycznym i w przypadku potrzeby odtworzenia podobnych testów przez innych autorów, łatwym do naprawienia.

Jako wyróżniającą się zaletę metodyczną należy wskazać istotną część pracy, obejmującą badania symulacyjne w oparciu o metodę elementów skończonych (MES) – rozdział 7. Jest to udana próba implementacji wyników badań pomiarowych w symulacji rozruchu, której wyniki stanowią bardzo przystępną i obrazową ilustrację specyfiki rozruchu badanego układu w zależności od jego konfiguracji (rodzaj materiału, wymiary próbki). Przedstawione wyniki symulacji pozwoliły na potwierdzenie tezy możliwości opisu rozruchu z wykorzystaniem współczynnika rozruchu σ_r , czyli głównej tezy pracy.

Dokładne zapoznanie się z pracą pozwala się przekonać, że **założony cel główny i cele szczegółowe zostały osiągnięte** przez Doktoranta metodami zgodnymi z kanonem obowiązującym we współczesnej nauce.

2.3. Struktura rozprawy

Przedstawiona praca ma objętość 136 stron, przy czym zawiera również odsyłacz do repozytorium danych badawczych z całości zrealizowanych prac eksperymentalnych, co stanowi cenny dodatek dla innych badaczy, pragnących zgłębiać podobną tematykę.

Rozprawa złożona jest z ośmiu rozdziałów i spisu materiałów źródłowych. Pierwsze dwa rozdziały obejmują wprowadzenie i wnikliwy przegląd literaturowy i metodologiczny, adekwatny dla podejmowanego problemu i sięgający do odpowiednich źródeł (łącznie 42 strony). Narracja w rozdziałach wstępnych została poprowadzona w taki sposób, że Autor mógł w rozdziale trzecim płynnie przejść do wyraźnego nakreślenia głównej tezy, oraz wynikających z niej celów szczegółowych, z podziałem na zakres poznawczy i użyteczny. Pomimo niewielkiej objętości (3 strony), rozdział ten daje jednoznaczny pogląd na zamiar badawczy Autora w bezpośrednim związku z wnioskami płynącymi z wcześniejszych rozdziałów wprowadzających.

W dalszej części pracy zamieszczone są kolejne trzy rozdziały opisujące szczegółowo kolejne etapy badań. Taka konstrukcja tekstu wynika w jasny sposób z nakreślonego programu badań i zakresu czynników objętych naukowymi dociekaniami. W pracy na każdym etapie widoczna jest dbałość o zachowanie kanonicznej struktury elaboratu naukowego o charakterze głównie empirycznym, obejmującej teorię, metodykę, badania empiryczne i symulacyjne, dyskusję wyników i wnioski. Wymienione rozdziały od czwartego do szóstego włącznie stanowią przeważającą część objętości opracowania (47 stron). Warto podkreślić, że konieczność rozdzielenia prac doświadczalnych na trzy osobne części wynika ze złożoności procesu, który jest w centrum zainteresowań Autora. Rozruch w kontakcie ślizgowym, w styku płaskim, gdzie skojarzone ze sobą materiały charakteryzują się bardzo dużą różnicą zdolności do odkształcenia (głównie modułem sprężystości), odbywa się przy udziale znacznych zmian kształtu jednego z ciał w kontakcie ciernym, a co za tym idzie zmian kształtu i geometrii rzeczywistej strefy styku, oraz rozkładu i wartości nacisków. Ponadto, właściwości tworzyw sztucznych, w tym nieliniowa charakterystyka sprężystości, czy tendencja do pełzania pod obciążeniem stawiają przed badaczem szczególne wymagania odnośnie staranności w formułowaniu szczegółów metodyki badawczej i zakresu analiz. Ta staranność przekłada się na znacząco zwiększoną pracochłonność badań, bo konieczne jest, *de facto*, zbadanie eksperymentalne charakterystyk mechanicznych zastosowanych tworzyw w warunkach eksperymentu, zanim możliwe będzie zrealizowanie głównego celu, czyli obserwacji przebiegu rozruchu. W przypadku recenzowanej pracy zarówno właściwa staranność, jak i adekwatny wkład wysiłku badawczego są widoczne na każdym etapie realizacji zadania. Na potwierdzenie tej oceny można przytoczyć fakt, iż cały rozdział szósty pracy obejmuje opis metodyki, testów i wyników doświadczalnej oceny pełzania materiałów polimerowych w warunkach obciążenia odpowiadającego warunkom przyjętym w badaniach tribologicznych.

W kolejnym rozdziale, siódmym, Autor podejmuje próbę pomocniczej analizy stanu systemu tribologicznego w trakcie rozruchu z wykorzystaniem symulacji MES na uproszczonym modelu skojarzenia ślizgowego. Takie podejście jest pod każdym względem prawidłowe, ponieważ pozwala skonfrontować wyniki badań empirycznych z modelem matematycznym, którego uwarunkowania mogą być precyzyjnie zdefiniowane tak, aby w jak najlepszy sposób odwzorowywały warunki eksperymentu. Jednocześnie i badacz, i odbiorca mają szansę na pogłębiony wgląd w obserwowane zjawiska i procesy, również od strony praktycznej, związanej z ewentualną implementacją wyników w praktyce inżynierskiej.

W dalszej części pracy zamieszczony został krótki (2 strony) rozdział z globalnym podsumowaniem rezultatów zrealizowanych prac i ze sformułowanymi wnioskami. Jest to przejrzyste, ostateczne podsumowanie całości wysiłków eksperymentalnych i analitycznych, które wiąże ze sobą w całość wszystkie wątki obecne w pracy. Pomimo niewielkiej objętości ta część pracy w precyzyjny i wystarczający sposób zamyka dyskurs w ścisłym związku

z drobiazgowymi podsumowaniami cząstkowymi poszczególnych etapów badań. Wnioskowanie jest prawidłowe i przeprowadzone w zgodzie z wynikami prac badawczych.

Końcowe strony pracy zawierają zestawienie literatury i innych materiałów źródłowych (6 stron), włącznie z cennym odwołaniem do repozytorium danych badawczych (Mendeley), gdzie zamieszczono komplet danych badawczych wytworzonych w toku realizacji pracy.

2.4. Odwołania do źródeł faktograficznych

Lista prac źródłowych, wykorzystanych podczas przygotowań i właściwej realizacji pracy obejmuje 99 pozycji, przy czym 1 pozycja to odwołanie do repozytorium wyników. Przytoczone prace obejmują wszelkie możliwe kierunki poszukiwań w literaturze fachowej i sięgają od źródeł historycznych, czy wręcz klasycznych dla tribologii (np. poz. [36] F.P. Bowden, A.J.W. Moore, D. Tabor, The ploughing and adhesion of sliding metals, J. Appl. Phys. 14 (1943) 80–91) aż po najbardziej aktualne, tj. z obecnej dekady XXI wieku. Specyfika źródeł obejmuje inżynierię materiałową, tribologię doświadczalną, mechanikę teoretyczną, a także pozycje typowo inżynierskie, niezbędne do odniesienia dociekań naukowych do praktyki, ale również do odpowiedniego przygotowania badań symulacyjnych (np. podręczniki MES). Autor nie stroni od publikacji obcojęzycznych, głównie w języku angielskim, co należy uznać za potwierdzenie posiadania adekwatnych kompetencji również w tej dziedzinie. Ogólnie można opisać przeprowadzony przegląd literaturowy jako celny i przekrojowy, zarówno pod względem tematycznym, jak i chronologicznym, a także zgodny z realizowaną tematyką badawczą.

2.5. Szczegółowa ocena merytoryczna części rozprawy

Przedstawiona praca jest poprawna pod względem merytorycznym, dzięki czemu zasługuje na pozytywną ocenę. Jednocześnie, jak każde dzieło tego typu zawiera pewne szczegóły zasługujące na krytyczny komentarz, jednak wyłącznie o charakterze wskazówek mogących ułatwić dalszy rozwój naukowy i warsztatowy Doktoranta. Ponadto, traktuję uwagi zamieszczone w niniejszej opinii jako punkty wyjścia do szczegółowej polemiki i szczegółowych dookreśleń, co przecież stanowi istotę dociekań naukowych.

Rozdział 1 – Wprowadzenie – ma charakter na wskroś jednoznaczny i syntetyczny. Wskazuje na główne zagadnienia stanowiące podłoże wyboru tematu badawczego, określa główne problemy badawcze i ich kontekst w związku z zastosowaniami materiałów polimerowych w technice i identyfikacją, oraz opisem faz przejściowych w ruchu ślizgowym. Jednocześnie Autor nakreśla granice swoich rozważań i przedstawia główny cel analizy, mającej przybliżyć odpowiedź na postawione wprost pytanie: „Jak zdefiniować rozruch w węzłach tarcia?”. W pracy naukowej, a w szczególności związanej ze sztuką inżynierską, takie bezpośrednie stawianie problemu jest jak najbardziej właściwe.

Rozdział 2 – Przegląd literatury – jest obszerny i obejmuje wiele szczegółowych zagadnień związanych bezpośrednio i pośrednio z tematyką pracy. Jak już zostało wcześniej zauważone, specyfika tematu wymagała od Autora poświęcenia uwagi zagadnieniom z kilku dziedzin i fakt ten znajduje odzwierciedlenie w strukturze i treści rozdziału 2. Wydzielone zostały pięć podrozdziałów: *Własności fizyczne i tribologiczne polimerów ślizgowych oraz ich wpływ na proces rozruchu*, *Tribologia polimerów ślizgowych w kontekście rozruchu*, *Zastosowanie metody elementów skończonych w tribologii*, *Tarcie statyczne, a proces rozruchu* i *Podsumowanie przeglądu literatury*. Jest to, bez mała, osobna monografia obejmująca najważniejszą tematykę związaną z procesem rozruchu w tarciu ślizgowym polimerów i wyczerpująco przedstawiająca podłoże podjętego tematu badawczego w postaci aktualnego stanu wiedzy.

W niektórych punktach rozdziału można by się pokusić o bardziej jednoznaczne, lub ogólne określenia opisanych faktów. Przykładowo, w zakończeniu punktu 2.1 Autor mówi o „dynamice obciążenia” próbek, jak istotnym czynnikiem wpływającym na zachowanie tworzyw lepkosprężystych. To prawda, jednak może bardziej ogólnie zabrzmiało by sformułowanie

zmienność obciążenia w funkcji czasu. W mojej opinii może pozwolić na uniknięcie ograniczenia skojarzeń wyłącznie do zjawisk o charakterze cyklicznym, co byłoby ograniczeniem pojęciowym. W punkcie 2.2.6, w początkowej części, Autor wspomina o wpływie wilgotności powietrza proces tarcia, co jest stwierdzeniem słusznym, przy czym warto w takim przypadku wspomnieć ogólnie o składzie otaczającej atmosfery, bo w technice istnieją przykłady zastosowań tworzyw sztucznych na skojarzenia ślizgowe funkcjonujące w warunkach beztlenowych, gazach nie występujących w powietrzu, czy w próżni. W punkcie 2.3, odnoszącym się do metody elementów skończonych znajduje się stwierdzenie, że z użyciem MES „możliwe jest wyznaczanie wielkości fizycznych, których pomiar na obiekcie rzeczywistym jest niemożliwy”, co zawsze wymaga uściślenia iż jest to metoda przybliżona każdy wynik uzyskany tą metodą jest obarczony błędem. Oczywiście, przy prawidłowym sformułowaniu zadania i realizacji czynności przygotowawczych jest to błąd o zadowalająco małej wartości, jednak warto podkreślać ten fakt przy każdym przywołaniu metody. W punkcie 2.4, na początku strony 42, mowa jest o zwiększaniu wartości siły tarcia w początkowej fazie ruchu (ślizgania) w wyniku obecności na powierzchni zanieczyszczeń. Autor doprecyzowuje dalej, iż dodatkowe opory mają wynikać z konieczności przerwania, usunięcia lub przemieszczenia warstwy zanieczyszczeń. Z pewnością istnieją warunki, w których jest to prawdą, jednak obawiam się możliwości istnienia efektu odwrotnego. Wiele zależy od właściwości substancji obecnych na powierzchni, które można określić mianem ‘zanieczyszczeń’, pośród których wiele może spełniać funkcję substancji smarującej.

Jako przykład pozytywny, dbałości Autora o jednoznaczność i przejrzystość wyводу, warto wskazać podane propozycje definicji rozruchu (p. 2.4, początek str. 46), które są niezbędne dla nadania właściwej perspektywy wywodowi. Rozumiem, że obie definicje wynikają z analizy materiałów źródłowych, mógłbym tutaj dodatkowo zaproponować uzupełnianie w przyszłości podobnych stwierdzeń o wzmiankę odnośnie istnienia roli odkształcalności ciał w skojarzeniu ślizgowym w przebiegu rozruchu (szczególnie polimerów), bo przecież właśnie ten temat aktualnie mieści się w centrum zainteresowań badawczych Autora. Bardzo cennym szczegółem w rozdziale jest zamieszczone w zakończeniu punktu 2.4 odniesienie do roli współczynnika rozruchu σ_r , gdzie wymieniona jest obszerna lista parametrów fizycznych cechujących powierzchnie styku oraz ich otoczenie (np. geometria próbek – grubość), a także charakterystyka wymuszeń. Ten punkt potwierdza zgodność pracy z aktualnym trendem w tribologii, w którym postuluje się iż obserwowane tarcie jest efektem działania systemu, w którym jest wywoływane, co w mojej opinii stanowi o aktualności i nowoczesności zaprezentowanego podejścia naukowego.

W ostatnim punkcie rozdziału (2.5) zamieszczone zostało krótkie podsumowanie analizy źródeł literaturowych, gdzie z krystaliczną jednoznacznością oceniono aktualny stan wiedzy odnośnie przebiegu rozruchu w skojarzeniach ślizgowych i wykazano istotną lukę, dającą przestrzeń do naukowych dociekań proponowanych przez Autora oraz asumpt do sformułowania tezy i celów badań.

Rozdział 3 – Teza, cel i zakres pracy – stanowi przykład prawidłowo skonstruowanego elementu wyvodu, gdzie Doktorant artykułuje w zgodny z przyjętą konwencją zestaw wytycznych i określa pole dociekań mających być zrealizowanymi w toku pracy. Teza: „**Proces tarcia podczas rozruchu par ślizgowych metal – polimer można opisać z wykorzystaniem współczynnika rozruchu σ_r , który określa jaka część trefy styku jest w poślizgu**” jest ściśle powiązana z oceną aktualnego stanu wiedzy i zapowiada uzyskanie wartości dodanej dla dziedziny naukowej po zrealizowaniu prac badawczych (co, szczęśliwie miało miejsce w przedmiotowym przypadku). Wymienione dalej trzy cele poznawcze i cztery użytkarne dobrze korelują z tezą, a całości dopełnia umieszczona dalej skrótowa charakterystyka zrealizowanej sekwencji zadań badawczych. Korzystnie wypada tu również schemat zależności pomiędzy poszczególnymi modułami badań (rys. 3.1) ułatwiający uchwycenie powiązań między analityką, symulacją i bazami danych źródłowych. Lektura tej części pracy pozwala jednoznacznie zrozumieć przyczyny i cel działań autora.

Rozdział 4 – Badania powierzchni styku podczas rozruchu – jest dobrze przygotowanym, uzasadnionym metodycznie sprawozdaniem z pierwszego z modułów badań, składających się na całość pracy. Autor prawidłowo opisuje cel, sposób oraz wyniki realizowanych badań. Zgodnie z przyjętym kanonem, opis przedstawiono szczegółowo techniczne aparaty, materiałów i procedury badawczej, po czym zamieszczono opis przebiegu samych testów ze stosownymi komentarzami. Koncepcja badań z wykorzystaniem optycznej rejestracji strefy styku pozwoliła na zgromadzenie danych bardzo nośnych informacyjnie i ułatwiających wyobrażenie kinetyki procesu rozruchu. Uwidoczniona migracja strefy styku w obrębie teoretycznego pola kontaktu między próbkami stanowi empiryczną ilustrację mechaniki kierunku i zakresu odkształceń próbki polimerowej w warunkach złożonego obciążenia jest niezastąpionym wkładem do wszelkich analiz symulacyjną przebiegu rozruchu. Wyniki z tej części badań są ściśle powiązane merytorycznie z pozostałymi modułami pracy, co potwierdza prawidłowość przyjętych założeń co do zakresu i struktury programu badawczego.

Wnikliwa lektura rozdziału ujawnia pewne mankamenty, które warto poddać dyskusji, w celu dodatkowego podniesienia ostatecznego efektu wysiłków Autora. Na rysunku 4.3. przedstawiono dwie fotografie styku próbek elastomerowych ze sztywnym podłożem przezroczystym, jednak brakuje przy nich opisu pozwalającego na identyfikację tworzyw i warunków (np. obciążenia normalnego), w jakich wykonano fotografie. Wprawdzie w tabeli 3 wymieniono dwa materiały wykorzystane w badaniu, ale nie wiadomo który znajduje się na której pozycji na rysunku.

Opis rozkładu nacisków na czole próbki również zasługuje na pewne doprecyzowanie. Ostatnie zdanie na stronie 56 brzmi: „W środkowym obszarze próbki występuje obszar o nacisku zbliżonym do nominalnego, natomiast maksymalne wartości występują w pobliżu krawędzi.”. Mam wrażenie, że to zdanie nie zgadza się z profilem nacisków na rysunku 4.4; wydaje się być tak, że ukośna część linii niebieskiej na wykresie profilu nacisków zdaje się symbolizować zmniejszanie się nacisków do wartości bliskiej zeru w pobliżu brzegu powierzchni styku. Jeśli symbolika tych części linii ma być przeciwna, to należało to wyraźnie opisać. Ponadto przedstawiony na rysunku 4.4 rozkład nacisków i sił stycznych (ściskających) w strefie styku nie musi być zgodny z rzeczywistością. W opracowaniach technicznych (np. poradniach inżyniera mechanika) podaje się tego typu przykłady w odniesieniu do stanu naprężeń dla niektórych, typowych kontaktów spotykanych w technice. Faktycznie, tego typu przykłady mogą być zgodne z profilem przytoczonym na rys. 4.4, jednak w przypadku opisywanych badań to nie musi być prawdą. Obciążenie osiowe polimeru o stosunkowo małym module sprężystości będzie powodowało odkształcenia osiowe (skrócenie), jednak przy praktycznie niezmiennym objętości próbki musi dojść do 'spęczenia' próbki; w omawianym układzie do zwiększenia średnicy, co wywoła ograniczony poślizg promieniowy i resztkowe naprężenia styczne (tarcie), o orientacji promieniowej. Przy małym odkształceniu podłużnym, ten fakt może być nieistotny i przybliżenie jest zadowalające, przy większych odkształceniach zyskuje na znaczeniu. Organoleptycznie ten efekt można zaobserwować w postaci zmiany kształtu ściskanej próbki walcowej na beczkowaty.

Wyróżnioną w poprzednim akapicie kwestię traktuję głównie jako wskazówkę, do większej czujności podczas komponowania opracowań tekstowych o większej objętości, ponieważ Autor w dalszej części pracy udowodnił, że doskonale rozumie opisywane zagadnienie szczegółowe. W pracy przeprowadzono analizę symulacyjną rozkładu naprężeń w strefie styku w dalszej części (rozdział 7) i wyniki słusznie potwierdzają występowanie wspomnianego efektu koncentracji nacisków na krawędzi strefie styku i innych, interesujących efektów, ważnych dla całości programu badawczego. Stwierdzam więc, że Autor dochował należytej staranności w sensie merytorycznym i przeprowadził wszelkie potrzebne analizy problemu, jednak w rozdziale 4 doszło to pewnego niedociągnięcia narracyjnego.

Końcowa część rozdziału 4 pozwala czytelnikowi na przekonanie się naocznie o specyficznej kinetyce zmian rozmiarów, położenia i kształtów strefy styku w fazie ruchu poprzedzającej rozwinięcie się poślizgu. Zrealizowanie zadanie cząstkowe stanowi niezbędną część całości analizy, będącej przedmiotem dysertacji.

Rozdział 5 – Badania tarcia statycznego – obejmuje bez mała $\frac{1}{4}$ objętości pracy. To merytorycznie najważniejsza część pracy i bez wątpienia zawarty w niej ładunek treści jest odpowiedni do zadania. Pod względem struktury, rozdział odpowiada wymaganiom stawianym sprawozdaniom z naukowych prac badawczych, z adekwatnym opisem aparatury badawczej, właściwości zastosowanych materiałów i typów wykorzystanych próbek, rozbudowaną częścią odnoszącą się do budowy programu badań, opartej na statystycznych metodach planowania eksperymentu i obróbki danych pomiarowych, a dalej z opisem wyników z podziałem na poszczególne materiały polimerowe.

Staranne i obszerne opracowanie materiału. Drobiazgowo podejście do przygotowania pracy, gromadzenia i analizy danych. Znakomita, czytelna prezentacja, pozwalająca bezzwłocznie zaobserwować różnice w przebiegu rozruchu dla poszczególnych materiałów, przy kompleksowym zestawie parametrów badań (czas postoju, obciążenie, grubość próbki i prędkość narastania siły poprzecznej). Przeprowadzone badania mają dzięki temu charakter wyznaczenia wielowymiarowej charakterystyki zachowania eksperymentalnych par ślizgowych w warunkach rozruchu. Wzrost poznawczy uważam tutaj za ściśle skorelowany ze znaczeniem praktycznym wyników. W mojej opinii zawarte w pracy wyniki mogą być przydatne do wspomagania zadań typowo inżynierskich, a sama metodyka realizacji badań nadaje się do zastosowań w innych, podobnych pracach, przy niewielkich zabiegach dostosowujących do szczegółowych wymagań zadania. Uważam przedstawione charakterystyki zależności rejestrowanych sił tarcia od prędkości narastania siły poprzecznej za wynik unikatowy, który może być wprost wykorzystany do prób doskonalenia metod symulacji działania układów mechanicznych z tarciami, w szczególności drgań swobodnych i wymuszonych. Rozdział 5 jest prawdopodobnie najlepszym w pracy.

Rozdział 6 – Badania uzupełniające – pełzanie materiałów polimerowych, jest kolejnym dowodem na kompleksowe podejście Autora do problemu. Starając się osiągnąć pełny obraz procesów składających się na rozruch przeprowadził doświadczalną walidację właściwości lepkosprężystych zastosowanych tworzyw. Uzyskane rezultaty należy uznać za prawidłowe, uzyskane z typową dla tej pracy solidną podstawą teoretyczną i zgodnie z odpowiednim planem eksperymentu. Lektura tego rozdziału nasunęła mi pytanie o kwestię wymiarów próbek. Na stronie 96, w pierwszym akapicie podano średnicę próbki $D=8\text{mm}$. Chciałbym się dowiedzieć, czy była to taka sama średnica, jak w przypadku badań tarcia? Nie udało mi się odnaleźć tej informacji w innych częściach pracy, co jednakże nie umniejsza jej wartości. Ponadto, w opisie po rysunku 6.3 (str. 100) jest mowa o przyczynie rozbieżności między modelem i pomiarami zachowania lepkosprężystego badanych materiałów w postaci częstotliwości próbkowania. Jak rozumiem, pomiary zostały wykonane w punktach 0,1s i 60s, co spowodowało pewną rozbieżność wykresów w zakresie od 1s do około 100s. Czy prawidłowo zinterpretowałem tekst?

Rozdział 7 – Symulacje numeryczne – procesu tarcia podczas rozruchu stanowi końcowy moduł w wielowątkowym programie badań doświadczalnych, składających się na całość dociekań Autora. Zrealizowana analiza jest bardzo dobrym przykładem współczesnego podejścia do badań doświadczalnych wspartych metodami symulacyjnymi. Prawidłowo zrealizowana symulacja procesu, skonfrontowana z wynikami badań doświadczalnych pozwala na uzyskanie rezultatów o zupełnie nowej jakości, ponieważ możliwa jest ocena niuansów obserwowanych procesów fizycznych, a jednocześnie rozwój metodyki symulacji, dzięki analizie wyników symulacji osadzonych w realiach fizycznych szczególnych dla wybranego procesu. Poniżej zamieszczam kilka uwag, bardziej o charakterze polemicznym, czy precyzującym, niż krytycznym.

Na str. 101, w pierwszym akapicie znajduje się zdanie: *„Dane te nie wyjaśniają jednak jaki jest charakter zmian powierzchni styku podczas rozruchu pary trącej. Zastosowanie metody elementów skończonych do opracowania numerycznego modelu uniwersalnego węzła tarcia pozwala na analizę wielu czynników nie będących przedmiotem badań eksperymentalnych, a mających wpływ na przebieg rozruchu.”* Ten opis dotyczy w mojej ocenie, de facto, zmian geometrii próbki w wyniku łącznego działania obciążenia normalnego

i siły tarcia (stycznej), oraz spowodowanych tymi zmianami zmian kształtu, położenia rzeczywistej powierzchni styku i występującego na niej rozkładu nacisków. Dwa akapity niżej Autor formułuje podobną myśl, którą w można podawać bez wstępów. Pomiar tarcia jest zazwyczaj prostą obserwacją pewnych sił w układzie mechanicznym z ruchem względnym elementów. Sam pomiar nie zwraca wprost informacji o procesie na powierzchni. Tę wiedzę często uzyskujemy pośrednio, np. poprzez analizę zmienności tarcia w funkcji innych parametrów, czy zmiennych. Analiza odpowiedzi systemu na wymuszenia (np. odkształcenie pod wpływem sił w strefie styku) jest obecnie najlepszym sposobem weryfikacji faktycznego stanu badanego kontaktu w trakcie eksperymentu, dlatego pisanie wprost o co chodzi jest jak najbardziej uzasadnione.

Na str. 102, w ostatnim akapicie znajduje się zdanie: „*Kolejnym uproszczeniem jest pominięcie chropowatości elementów współpracujących. Chropowatość nie jest modelowana geometrycznie, jej wpływ był uwzględniony we wprowadzonych danych dotyczących współczynnika tarcia.*”. Oceniam, że to bardzo słuszna decyzja. Warto wspomnieć o kwestii skali i wynikającego stąd ograniczenia metody. Rozmiary próbki w porównaniu z rozmiarami mikronierówności są większe o nie mniej niż 3 rzędy wielkości. W przypadku modelowania MES takie różnice są często nie do zaakceptowania, np. z powodu osobliwości obliczeniowej objawiającej się przy stosowaniu elementów skończonych o bardzo małych rozmiarach w obszarach o dużych zmianach kształtu (np. rowkach). W kontekście modelu powierzchni styku elementów, chciałbym prosić o doprecyzowanie, czy elementy kontaktowe (na powierzchni styku) posiadały zdolność separacji w przypadku wystąpienia na powierzchni styku sił rozciągających ?

Na str. 105, w przedostatnim akapicie znajduje się zdanie: „*Nawet zagęszczając kroki obliczeniowe – zmniejszając czas pomiędzy kolejnymi stanami obliczeniowymi dochodzono do momentu, w którym następowało nagłe zerwanie styku stacjonarnego i przemieszczenie całego elementu polimerowego skokowo o znaczną wartość.*” W jaki sposób zdefiniowano funkcję tarcia w elementach kontaktowych? Badania doświadczalne wykazały, że tarcie zależy w naszym przypadku od obciążeń normalnych na powierzchni styku, czasu i prędkości narastania obciążenia poprzecznego. Implementacja tak wielu parametrów w modelu MES jest trudna, bo może skutkować powstaniem sprzężeń zwrotnych w modelu i uniemożliwić uzbieżnienie, czyli uzyskanie użytecznego wyniku. Czy mogę poprosić o dodatkowe wyjaśnienie?

Na rysunku 7.4 (str. 106) przedstawiono schemat obciążenia modelu próbki i postać jej odkształcenia, natomiast wcześniej, na rys 4.8 i 4.9 przedstawiono, odpowiednio, wyniki obserwacji migracji rzeczywistej strefy styku pod wpływem siły poprzecznej (tarcia) i schemat odkształcenia próbki (zginania) pod wpływem tej siły. W obu przypadkach udokumentowano separację powierzchni próbki od powierzchni podparcia po stronie krawędzi 'tylnej'. Zdaję sobie sprawę z trudności w realizacji takiego zadania i zgadzam się z możliwością przeprowadzenia analizy przy pewnym uproszczeniu, jednak poproszę o wyjaśnienie, które może się przydać w przyszłych badaniach. Czy model MES uwzględniał tego typu zmiany konfiguracji kontaktu ciernego?

Powyższe pytanie jest w bezpośrednim związku z rysunkami 7.17 i 7.18, gdzie przedstawiono rozkłady sił normalnych i stycznych dla styku PE-UHMW – C45, i dalej, na kolejnych parach wykresów kolejne skojarzenia materiałowe, aż do rysunku 7.28. Na profilu sił stycznych i normalnych widoczne są tam obszary o zerowej wartości. Czy należy je interpretować właśnie jako separację powierzchni po stronie 'tylnej' próbki?

W tabeli 12 (str. 106) i dalej w kolejnych, podobnych tabelach, przedstawiono wartości sił tarcia wyznaczonych dwiema metodami. O jakie siły tarcia chodzi? Statyczne, kinetyczne, czy średnią z tych dwóch? Wyniki pomiarów i symulacji są bardzo zbliżone, a to cenny rezultat, jednak koniecznie należy doprecyzować co zostało przedstawione.

Na stronie 116 w przedostatnim akapicie opisano obserwację: „*Wynika z tego, że zwiększenie grubości polimerowego elementu przy zachowaniu warunków wymuszenia zawsze będzie prowadziło do wydłużenia czasu rozruchu.*” Warto pamiętać, że chodzi o wartość grubości/długości swobodnej, tj. tej części próbki, która wystaje ponad powierzchnię

uchwyty, czy innego, sztywnego elementu nośnego. Innymi słowy, tej części, która może się swobodnie zginać pod działaniem siły tarcia.

Na rysunkach od 7.14 do 7.16 przedstawiono rozkłady nacisków w analizowanych skojarzeniach ślizgowych. To jest bardzo ważna i prawidłowo zrealizowana część tej pracy. Dotyka kluczowego zagadnienia tribologii – lokalnego stanu obciążenia powierzchni, na której występuje tarcie. Korelacja między odkształcalnością ciał w styku ślizgowym, obciążeniem, faktycznym obszarem kontaktu ślizgowego itp. to wstęp do doskonalszych i użytecznych praktycznie modeli tarcia. Muszę jednak w tym miejscu odwołać się do rysunku 4.4, który został przeze mnie skomentowany już wcześniej. Przedstawiono tam typowy, schematyczny rozkład nacisków dla pewnej klasy dwóch płaskich ciał w styku, tak jak to jest przedstawiane w podręcznikach technicznych, np. Poradniku Inżyniera Mechanika. Zamieszczenie takiego rysunku w niniejszej pracy jest słuszne, jednak cały wydźwięk opracowania mógłby znacznie zyskać, gdyby powiązać ten typowy profil (rys. 4.4) z analizą zilustrowaną wynikami na rysunkach 7.14 do 7.16. Pozwoliłoby to na wykazanie, jak w ogólnej praktyce inżynierskiej obecnie stosuje się uproszczenia, które do wielu klas skojarzeń ciernych po prostu nie pasują. Ponadto, każdy czytelnik natychmiast otrzymałby jednoznaczny przekaz o ograniczonym zaufaniu do typowych modeli i danych podręcznikowych, a dalej informacje o możliwości weryfikacji tej wiedzy w przypadku rozwiązań poza schematem.

Rozdział 8 – Podsumowanie i wnioski – zamyka całość wyводу syntetycznym i skrótowym podsumowaniem. Ten rozdział ma w dużej mierze charakter formalności, zważywszy na modułowy charakter pracy i wnioski sformułowane wcześniej w poszczególnych rozdziałach opisujących realizację prac przez Autora. Ostateczne wnioski są prawidłowe i zgodne z całością pracy. Podsumowują wyniki prawidłowo i wskazują na najistotniejsze osiągnięte efekty, w tym na osiągnięcie założonych na początku celów pracy, co Autor stwierdza wprost w ostatnim zdaniu tekstu, z czym po lekturze przedłożonego opracowania trudno się nie zgodzić.

Program pracy zawierał grubość próbki, jako jeden z czynników prawidłowo uwzględnionych w programie badań, co znalazło swoje odzwierciedlenie w wynikach i wnioskach. Uważam, że ten wątek może zasługiwać na rozwinięcie w przyszłości, szczególnie pod względem możliwości rozszerzenia stosowalności wyników osiągniętych w omawianej pracy na inne przypadki skojarzeń ślizgowych. Geometria próbki stanowi o jej właściwościach mechanicznych tj. podatności na odkształcenia i postaci tych odkształceń. Większa grubość (czy też wysokość próbki) najprawdopodobniej będzie skutkować zwiększaniem podatności na odkształcenie poprzeczne próbki (w kierunku prostopadłym do osi próbki) i 'ukosowanie' czoła próbki, głównie w wyniku działania zginającego siły tarcia. Próba uwzględnienia wpływu na rozruch i tarcie ślizgowe właściwości próbek, rozumianych jako belki zginane może być wątkiem wartym dalszego rozwinięcia, jako uogólnienia wyników już zrealizowanych badań na klasę kontaktów typu pin – on – flat. Serdecznie zachęcam Autora do rozważenia tego typu analizy, ponieważ jestem przekonany iż po realizacji pracy doktorskiej posiada po temu wszelkie potrzebne narzędzia i doświadczenie.

2.6. Poprawność językowa i formalna rozprawy

Od strony językowej i formalnej recenzowana dysertacja doktorska zasługuje na bardzo pozytywną ocenę. Autor posługuje się poprawną i precyzyjną polszczyzną, a styl języka jest dobrze dopasowany do tematyki. W tekście można dopatrzeć się nielicznych błędów językowych o charakterze interpunkcyjnym. Nie dopatrzyłem się odstępstw od zasad ortografii, co zasługuje na uznanie. Ewentualne niedociągnięcia stylistyczne, sporadyczne, np. nieliczne przypadki zastosowania rzeczownika „ilość” do opisu pojęć policzalnych, nie mają wpływu na przystępność i jednoznaczność przekazu.

Formalne wymogi przekazu również są spełnione. Autor na każdym etapie świadomie kształtuje przekaz, wyróżniając jednoznacznie poszczególne elementy wyводу w treści pracy. Wszelkie elementy, np. teza, czy cel pracy, zostały wyrażone wprost, jednoznacznie,

z zachowaniem prawidłowych związków z fundamentem merytorycznym pracy, jak i metodyką dobraną i wykorzystaną podczas realizacji zadań badawczych.

3. WNIOSKI I KONKLUZJA KOŃCOWA

Praca Pana mgr Inż. Mariusza Opałki stanowi bardzo interesujący i wartościowy wkład we współczesną tribologię. Bez wątpienia osiągnięte rezultaty wymagały od Autora bardzo dużego nakładu pracy, studiów źródłowych i wysiłku włożonego w rozwój własnych kompetencji w trakcie realizacji tematu. W powyższej recenzji zawarłem wiele komentarzy i uwag o charakterze krytycznym, jednak w żadnym przypadku wskazany przeze mnie szczegół wymagający moim zdaniem dalszego doskonalenia nie ma kluczowego znaczenia dla całości wydźwięku dzieła. Moich uwag nie należy traktować jako umniejszających jej jakość, czy znaczenie naukowe, a jedynie jako zachętę dla Autora do kontynuowania kariery naukowej. Praca spełnia kryteria ważne w przypadku pracy na poziomie doktoratu:

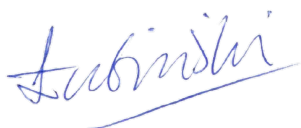
- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jednoznacznie i prawidłowo zdefiniowanego przez sformułowanie tezy i doprecyzowanej w listy szczegółowych celów badawczych,
- wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w reprezentowanej dyscyplinie,
- potwierdza zdolność Doktoranta do samodzielnej pracy naukowej.

Jako najważniejsze **zalety** recenzowanej rozprawy należy wymienić:

- ważność i aktualność podjętego tematu, w tym wypełnienie luki badawczej w wiedzy tribologicznej,
- przejrzystość opracowania monograficznego i uporządkowany wywód naukowy,
- rozbudowane podstawy metodologiczne – właściwie dobrane i przystępnie opisane metody badawcze,
- przeprowadzenie drobiazgowo przygotowanych, wielowątkowych badań doświadczalnych na wysokim poziomie,
- rzetelne opracowanie i przystępna prezentacja wyników badań empirycznych,
- konsolidacja wyników, pomiarowych, symulacyjnych i źródłowych (katalogowych) do postaci użytecznej prezentacji o znaczeniu poznawczym i praktycznym,
- umiejętność samodzielnego formułowania prawidłowych wniosków.
- precyzyjny i poprawny stylistycznie język, który ułatwia czytelnikowi przyswojenie treści,

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji dysertacja doktorska spełnia wymogi właściwej ustawy i reprezentuje dyscyplinę **budowa i eksploatacja maszyn** (wg. starej klasyfikacji, obecnie zastąpione przez **inżynierię mechaniczną**), więc **wniosuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Sporządził:



Dr hab. inż. Jacek Łubiński, prof. Politechniki Gdańskiej