

dr hab. inż. Lidia Gałda, prof. uczelni  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
ul. Powstańców Warszawy 8  
35-959 Rzeszów  
tel. +48 17 8561904  
e-mail: [lgktmiop@prz.edu.pl](mailto:lgktmiop@prz.edu.pl)

Rzeszów, 14.06.2023

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr. inż. Mariusza Opalki**

**pt. Analiza procesu tarcia par metal – polimer podczas rozruchu**

**Promotor pracy: dr hab. inż. Piotr Kowalewski, prof. uczelni**

Podstawą recenzji jest pismo o numerze W10/D/35/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 17 kwietnia 2023 roku.

#### **1. Uzasadnienie podjętego problemu**

Materiały polimerowe charakteryzują specyficzne własności, tj. mała gęstość, dielektryczność, mały współczynnik tarcia, dobra wytrzymałość właściwa, a przy tym duża łatwość formowania kształtu konkretnych elementów. Wyjątkowe własności polimerów, przede wszystkim małe opory ruchu, spowodowały, że materiały te są coraz chętniej stosowane na elementy ciernie. Jednocześnie odmienne charakterystyki materiałowe polimerów od powszechnie stosowanych metali, złożoność zjawisk podczas tarcia polimerów i różnorodność materiałów polimerowych doprowadziły do wyodrębnienia obszaru badawczego związanego z tribologią polimerów. Przedstawiona do oceny praca doktorska dotyczy analizy zjawisk, zachodzących w procesie tarcia wybranych materiałów polimerowych, będących w kontakcie z elementem stalowym podczas etapu rozruchu. Porównując etap rozruchu ciernych węzłów maszyn z pracą w stanie ustalonym, można stwierdzić, że rozruch jest najczęściej najtrudniejszym etapem pracy maszyny i może być etapem krytycznym, ponieważ wtedy dochodzi do dynamicznej zmiany wielu parametrów ruchu. Zjawiska, zachodzące w strefie styku elementów ciernych, nie zostały opisane w sposób pełny i wyczerpujący, dlatego strefa styku wciąż pozostaje interesującym obszarem badań naukowych. Szczególnie ma to miejsce w sytuacji stosowania nietypowych materiałów na elementy ślizgowe lub materiałów o specyficznych i dynamicznie zmieniających się właściwościach. Autor w swojej pracy do zasadniczych badań tribologicznych wybrał cztery polimery, znacząco różniące się właściwościami i współpracujące z elementem z typowej stali (stal C45). Ze względu na właściwości lepkosprężyste polimerów termoplastycznych materiały, wybrane do badań przez

Autora pracy, wykazują skłonność do pełzania, co w przypadku rozruchu może wpływać na zwiększenie oporów i wzrost współczynnika tarcia statycznego.

Biorąc pod uwagę wymienione powyżej argumenty, tj. złożoność zjawisk podczas etapu rozruchu par ciernych, specyficzne właściwości materiałów polimerowych, skłonność do pełzania polimerów i brak kompleksowego opracowania dotyczącego opisu zjawisk zachodzących podczas rozruchu par ciernych typu metal-polimer a jednocześnie coraz większe zainteresowanie stosowaniem tego typu węzłów ciernych w praktyce przemysłowej należy uznać, że podjęcie przez Autora rozprawy doktorskiej tematu pracy jest w pełni uzasadnione. Temat jest trafny pod względem naukowym, ponieważ wciąż nie wyjaśniono w pełni zjawisk w strefie styku metal-polimer szczególnie na etapie rozruchu. Biorąc pod uwagę użyteczny wynik pracy, należy zauważyć, że rezultaty pracy mogą być wykorzystane do doskonalenia właściwości tribologicznych obecnie znanych węzłów ciernych w skojarzeniu metal-polimer i ograniczyć opory ruchu oraz ich zużycie.

## 2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji praca obejmuje 136 stron, w tym strona tytułowa, streszczenia w języku polskim i angielskim, 2 strony spisu treści, 1 strona z wykazem skrótów i oznaczeń, 122 strony zajmuje część zasadnicza pracy, na 7 stronach przedstawiono spis literatury (99 pozycji). Rozprawa doktorska składa się z 9 głównych rozdziałów. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów oraz podział treści tworzą spójny i logiczny układ pracy.

Pierwszy rozdział pracy stanowi **Wprowadzenie**, w którym Autor przedstawia syntetycznie zagadnienia omówiane następnie w rozprawie doktorskiej. W tej części pracy Autor wymienia zalety termoplastycznych tworzyw sztucznych i zaznacza pewne cechy tworzyw (np. lepkosprężystość, maksymalne odkształcenie), na które należy zwrócić szczególną uwagę, analizując zastosowanie takich materiałów w praktyce. We Wprowadzeniu Autor akcentuje istotność wpływu dynamiki procesu rozruchu i właściwości materiałów polimerowych na przebieg etapu rozruchu, który następnie może znacząco oddziaływać na proces tarcia i zużycia węzła ciernego w skojarzeniu materiałowym metal-polimer.

W rozdziale drugim zatytułowanym **Przegląd literatury** Autor dokonał wnikliwej analizy literatury, szeroko omawiając zagadnienia związane z realizowaną pracą. Wśród przedstawionych tematów są m.in. własności fizyczne i tribologiczne polimerów, modele ciał lepkosprężystych, wpływ wybranych parametrów pracy na właściwości tribologiczne oraz zastosowanie metod elementów skończonych do modelowania procesu tarcia. Przegląd literatury jest dosyć obszerny, natomiast zakres pracy, przyjęty i zrealizowany przez Autora, był znaczny i wymagający szerokiej wiedzy, więc tak wyczerpujący przegląd literatury wydaje się być uzasadniony. Przegląd literatury kończy się Podsumowaniem, w którym Autor przedstawił syntetyczne wnioski i wytypował luki badawcze w analizowanym obszarze, co stanowiło podstawę do sformułowania tezy, celu i zakresu pracy.

W następnym rozdziale, trzecim Autor zdefiniował główny cel pracy, który wiązał się z rozpoznaniem zjawisk i analizą procesu tarcia wybranych polimerów termoplastycznych w początkowej fazie ruchu i tuż przed wystąpieniem ruchu. Stosownie do wyznaczonego celu Autor zaprezentował **tezę** pracy, która brzmi: „*Proces tarcia podczas rozruchu par ślizgowych metal-polimer można opisać z wykorzystaniem współczynnika rozruchu  $\mu_r$ , który określa jaka część strefy styku jest w poślizgu*”. W celu przybliżenia zadań koniecznych do wykonania Autor

przedstawił również szczegółowe cele, dzieląc je na poznawcze i użytkowe, a następnie omówił kroki badań i krótko metody badań, jakie zastosował w pracy.

Począwszy od rozdziału czwartego zatytułowanego **Badania powierzchni styku podczas rozruchu** rozpoczyna się część badawcza rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mariusza Opałki. Badania i analiza powierzchni styku pod działaniem sił normalnej i stycznej dla elementów węzła ciernego o znacząco różniących się właściwościach, w tym m.in. przy wielokrotnie mniejszym module sprężystości jednego z elementów stanowiły pewnego rodzaju wstęp do dalszych badań zasadniczych. Do badań wykorzystano specjalne stanowisko, umożliwiające realizację założonych obciążeń i obserwację strefy styku. W związku z tym, że koniecznym okazało się zastosowanie w parze cierniej elementu o odpowiedniej przezierności (płytką z poliwęglanu) to na elementy współpracujące dobrano materiały nietypowe dla węzłów ciernych, tj. poliuretan PUR oraz silikon kauczukowy VMQ. W ten sposób zademonstrowano jak zmienia się pole powierzchni styku podczas rozruchu materiałów lepkosprężystych. Sam pomysł takich badań i ich realizacja wydają się uzasadnione a wyniki interesujące, natomiast prezentacja schematów i wykresów rozkładu sił nacisku i stycznej wymagałyby uzupełnienia (lub wyjaśnienia). Po pierwsze schemat pary cierniej wydaje się być nieodwzorowujący geometrycznie węzła ciernego ze schematu na rys. 4.1 i zdjęć na rys. 4.2. Poza tym na schematach przedstawiających odkształcenie materiału polimerowego przedstawianego w kolejnych krokach etapu rozruchu brakuje opisu i oznaczeń poszczególnych elementów (przykładowo przy strzałkach). Dla Autora zapewne takie informacje są oczywiste, ale dla czystości przekazu odpowiednie opisy i oznaczenia powinny znaleźć się na prezentowanych rysunkach.

Rozdział piąty rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mariusza Opałki to najbardziej obszerny rozdział części badawczej pracy. W tym miejscu Autor zaprezentował **Badania tarcia statycznego**, zrealizowane w procedurze planowanego eksperymentu w celu uzyskania opisu matematycznego poszukiwanych zależności. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem specjalnego stanowiska do badań w ruchu toczno-ślizgowym, przy czym Autor pracy realizował eksperyment dla węzła ciernego typu trzpień-płytką, z trzpieniem pozostającym w spoczynku i płytką wykonującą ruch liniowy. Badania tarcia statycznego realizowano w różnych skojarzeniach materiałowych. Do planowania eksperymentalnych badań tarcia i analizy wyników Autor zastosował plan rotalny uniformalny, który umożliwił określenie wpływu trzech wybranych czynników wejściowych na opory ruchu. Autor stwierdził, że w wyniku przeprowadzonej analizy literatury do badań eksperymentalnych wybrał następujące parametry:

- grubość próbki polimerowej -  $g$ ,
- prędkość narastania siły stycznej -  $\dot{F}$ ,
- czas postoju skojarzenia pod obciążeniem -  $t_s$ .

Rzeczywiście są to parametry, które mogą wpływać istotnie na wartość siły tarcia, natomiast brakuje argumentacji dlaczego właśnie te a nie inne parametry wybrano do badań. Można było ewentualnie zastosować badania przesiewowe i ocenić istotność wpływu większej grupy parametrów, które potencjalnie mogą mieć wpływ na wynik badań tarcia, natomiast wiąże się to ze znacznym zwiększeniem liczby badań. Z kolei argumentacja dotycząca zakresu

zmienności badanych parametrów wejściowych była wyczerpująca oraz przekonująca i zakresy te przedstawiały się następująco:  $g = 1 - 10 \text{ mm}$ ,  $t_s = 1 - 60 \text{ s}$ ,  $\dot{F} = 0,1 - 10 \text{ N/s}$ .

Podczas realizacji badań według eksperymentu planowego bardzo ważnym warunkiem jest realizacja badań w sposób losowy tak, aby nie zakłócić wyników poprzez ewentualny błąd systematyczny. Wprowadzenie uproszczenia polegającego na realizacji badań w blokach dla wybranej grubości próbki polimerowej  $g$  mogło, chociaż nie musiało, wprowadzić pewne nieprawidłowości w ocenie istotności i zależnościach w otrzymanych równaniach regresji. Autor pracy zdecydował o zastosowaniu wybranego planu badawczego dla różnych skojarzeń materiałowych typu metal-polimer, gdzie wybrał cztery zróżnicowane pod względem własności polimery:

- polietylen o ultrawysokim ciężarze cząsteczkowym – PE-UHMW,
- politetrafluoroetylen – PTFE,
- poliformaldehyd – POM (poliacetal POM-C),
- polisulfon – PSU.

Następnie Autor zamieścił obszerną prezentację wyników w postaci tabelarycznej, graficznej za pomocą wykresów przestrzennych i konturowych wraz z analizą statystyczną i omówieniem wyników badań siły tarcia statycznego podczas rozruchu w odniesieniu do każdego skojarzenia materiałowego. Autor, określając wpływ wybranych parametrów kinematycznych i geometrycznych, umożliwił wyznaczenie takich wartości parametrów podczas rozruchu, które pozwolą na minimalizację współczynnika tarcia w pierwszej fazie ruchu, co będzie oddziaływać na dalszy etap pracy węzła ciernego. Biorąc pod uwagę otrzymane równania regresji, prezentujące zależności współczynnika tarcia statycznego od wybranych parametrów, należy stwierdzić, że modele te dobrze opisują badane obiekty. Współczynniki korelacji  $R$  mieściły się w zakresie  $0,8649 - 0,9161$  i przekraczały wartość krytyczną  $R_{kr}$  równą  $0,814$  dla poziomu istotności  $\alpha = 0,01$ . W wyniku oceny adekwatności modelu matematycznego za pomocą testu Fishera-Snedecora w odniesieniu do wyników rzeczywistych otrzymano równania adekwatnie opisujące badany obiekt dla skojarzeń ciernych z polietylenem PE-UHMW oraz poliacetalem POM-C. Otrzymane równania regresji zawierają zależności liniowe, kwadratowe oraz interakcje między niektórymi czynnikami wejściowymi. Na prezentowanych wykresach można zaobserwować punkty ekstremalne. Interesujący jest fakt, że dla dwóch materiałów tj. polietylenu PE-UHMW i polisulfonu PSU obserwujemy w pobliżu punktu centralnego maksymalne wartości współczynnika tarcia, natomiast dla zastosowanych materiałów politetrafluoroetyleny PTFE i poliacetalu POM-C wartości minimalne współczynnika tarcia statycznego podczas rozruchu. W większości otrzymanych modeli największy wpływ spośród analizowanych parametrów wejściowych wywiera grubość płytki polimerowej  $g$ , jedynie przy zastosowaniu w węzle ciernym poliacetalu POM-C największą istotność wykazuje prędkość narastania siły stycznej  $\dot{F}$ . W każdym przypadku czas postoju pod obciążeniem charakteryzuje się najmniejszym wpływem na wartość współczynnika tarcia statycznego podczas rozruchu.

W rozdziale szóstym zatytułowanym **Badania uzupełniające – pełzanie materiałów polimerowych** Autor przedstawił metodykę i wyniki badań wybranych parametrów lepkosprężystych materiałów polimerowych. Do badań Autor zastosował specjalne stanowisko, na którym pod obciążeniem ściskano próbki polimerowe o odpowiedniej geometrii

i w wyznaczonym czasie rejestrowano ich odkształcenie. Opracowane charakterystyki materiałów polimerowych posłużyły do symulacji komputerowych procesu tarcia z uwzględnieniem właściwości lepkosprężystych badanych materiałów, wyróżniających polimery spośród innych powszechnie stosowanych materiałów w węzłach ciernych czy ogólnie w budowie maszyn.

Rozdział siódmy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mariusza Opałki to kolejny obszerny i ważny rozdział pracy, dotyczący badań własnych Autora. W tym rozdziale, tj. **Symulacje numeryczne procesu tarcia podczas rozruchu** zostały zaprezentowane metodyka, założenia, wyniki i analiza badań z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Symulacje komputerowe umożliwiły analizę kolejnych istotnych parametrów procesu tarcia podczas rozruchu, jak np. charakteryzujących powierzchnię styku czy rozkład sił normalnej i ścinającej. Do opracowania modelu numerycznego i przeprowadzenia obliczeń Autor zastosował oprogramowanie Abaqus CAE w wersji z roku 2017. Model geometryczny pary ciernej odzwierciedlał elementy rzeczywiste stosowane w badaniach eksperymentalnych, natomiast w celu skrócenia czasu obliczeń Autor zastosował pewne uproszczenia, jak chociażby do obliczeń zastosowano model 2D stanowiący przekrój modelu przestrzennego 3D. Symulacja przebiegała w dwóch etapach, w pierwszym etapie ustalono styk pomiędzy elementami modelu i obciążono element polimerowy siłą równą 25 N, podobnie jak miało to miejsce w badaniach eksperymentalnych, a w kroku drugim realizowano przemieszczenie elementu polimerowego po sztywnej powierzchni, która reprezentowała stalowy element pary ciernej. Walidacji modelu dokonano poprzez porównanie wartości siły tarcia, obliczonych w oparciu o opracowany model, z wartościami zmierzonymi podczas badań eksperymentalnych. Wartości siły tarcia porównano dla wszystkich badanych polimerów i przy zróżnicowanej grubości elementu polimerowego, i otrzymano wysokie współczynniki korelacji  $R^2$  w zakresie 0,908 - 0,967, co świadczy o dużej zgodności modelu z badaniami eksperymentalnymi.

Do oceny zmian zachodzących w strefie styku podczas etapu rozruchu Autor zastosował parametr  $\sigma_r$  (z grek. omikron) - tzw. współczynnik rozruchu, który określa udział powierzchni pracującej w czasie tarcia kinetycznego i statycznego. Dla porównania poszczególnych wariantów skojarzeń materiałowych i par ciernych o zróżnicowanej grubości elementu polimerowego określono również czas rozruchu  $t_r$ , zdefiniowany jako czas od pojawienia się siły stycznej (wymuszającej ruch) do całkowitego poślizgu. W wyniku badań numerycznych stwierdzono, że wraz ze zwiększeniem grubości elementu polimerowego znacząco wydłuża się czas rozruchu niezależnie od zastosowanego materiału polimerowego, co Autor tłumaczy odkształceniami, które zachodzą w większej objętości materiału. W pracy przedstawiono wykresy, obrazujące rozkład siły nacisków w strefie styku podczas obciążania pary ciernej jedynie siłą normalną i po przyłożeniu siły stycznej z rozróżnieniem dla badanych materiałów polimerowych i analizowanych grubości elementu polimerowego  $g$ . Chociaż zaprezentowane wykresy rozkładu sił są jedynie jakościowe (nie naniesiono żadnych wartości sił), to wydaje się, że wraz ze zwiększeniem grubości elementu polimerowego obserwuje się bardziej równomierny rozkład siły normalnej w porównaniu do rozkładu przy najmniejszej grubości  $g$ , kiedy to maksymalne naciski obserwuje się w centralnej strefie styku. W pracy zaprezentowano także rozkłady sił normalnych i ścinających podczas rozruchu, demonstrując wyraźne, ale jakościowe różnice przy zastosowaniu poszczególnych polimerów o zróżnicowanych grubościach  $g$ . Zapewne łatwiej byłoby analizować prezentowane przypadki z podaniem konkretnych wartości sił na osiach wykresów.

W kolejnym rozdziale **Podsumowanie i wnioski** Autor syntetycznie podsumował wyniki pracy i przedstawił wnioski dzieląc je na poznawcze i utylitarne. W tym miejscu również mgr inż. Mariusz Opałka nakreślił kierunek i obszar dalszych badań zjawisk w procesie rozruchu.

Ostatni dziewiąty rozdział pracy stanowi spis **Literatury**, gdzie Autor przedstawił 99 źródeł literatury w kolejności pojawiania się w treści rozprawy doktorskiej. Wśród wymienionych pozycji znajdują się przede wszystkim książki renomowanych wydawnictw oraz recenzowane artykuły, a spora część artykułów jest w języku angielskim. Wymienione publikacje są aktualne oraz związane z tematyką pracy. Wśród publikacji są również artykuły, których współautorem jest Autor ocenianej rozprawy doktorskiej.

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przestawiona do oceny praca doktorska stanowi bardzo interesujące opracowanie dotyczące tribologii polimerów, poszerzające zakres wiedzy z obszaru analizy zjawisk podczas, często najtrudniejszego etapu pracy węzłów ciernych, tj. rozruchu. Dlatego podjęcie takiej tematyki przez Autora rozprawy oceniam bardzo wysoko.

Treść rozprawy jest zgodna ze zwięźle sformułowanym tematem pracy, wszczętym w przewodzie doktorskim reprezentującym dyscyplinę **budowa i eksploatacja maszyn**. Autor w sposób krytyczny dokonał analizy przeglądu literatury i wyciągnął prawidłowo wnioski. Zarówno cel główny, który brzmi: „*rozpoznanie i analiza procesu tarcia wybranych polimerów termoplastycznych w początkowej fazie ruchu oraz tuż przed nim*”, ale też pozostałe wyznaczone cele poznawcze i utylitarne zostały osiągnięte. Sformułowana przez Autora wstępna teza pracy: „*Proces tarcia podczas rozruchu par ślizgowych metal-polimer można opisać z wykorzystaniem współczynnika rozruchu  $\mu_r$ , który określa jaka część strefy styku jest w poślizgu*” została udowodniona. Chociaż tu drobna uwaga, tj. niepotrzebnie dodano do treści tezy w Podsumowaniu: „*...z powodzeniem...*”, ponieważ lepiej pozostać krytycznym nawet do swoich zadowolających wyników pracy.

Odnosząc się do metodologii pracy, to należy podkreślić, że mgr inż. Mariusz Opałka wykazał się wiedzą i umiejętnością stosowania w szerokim zakresie różnych instrumentów i metod badawczych. W zasadzie wszystkie stanowiska, na których realizowano badania to nie komercyjne urządzenia, ale stanowiska specjalne, które również wymagały modyfikacji w celu realizacji badań. W badaniach zasadniczych dotyczących tarcia statycznego Autor zastosował procedurę planowego eksperymentu z statystyczną analizą wyników badań. Mgr inż. Mariusz Opałka zaplanował i zrealizował badania parametrów lepkosprężystych materiałów polimerowych, co pozwoliło na opracowanie precyzyjnego modelu materiałów następnie stosowanych w symulacji komputerowej procesu tarcia. Dużym atutem pracy są badania z wykorzystaniem metody elementów skończonych i mgr inż. Mariusz Opałka bardzo sprawnie opracował model, zastosował dopuszczalne uproszczenia, zrealizował potrzebne obliczenia, walidację i analizę wyników badań numerycznych dotyczących rozruchu przy zróżnicowanych parametrach.

Generalnie praca mgr. inż. Mariusza Opałki napisana jest poprawnym językiem, znajdują się drobne usterki edytorskie. Zasadniczo słowa są dobrze dobrane do prezentowanej treści i pracę czyta się ze zrozumieniem. Niektóre ilustracje w pracy są słabej jakości (w przeglądzie literatury) i w rozdziale 7 na niektórych wykresach nie ma naniesionej skali liczbowej. Błędy

edytorskie nie wpływają jednak na wysoką wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mariusza Opałki.

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej stwierdzam, że praca spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania zagadnienia naukowego, Autor pracy wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu uprawianej dyscypliny naukowej oraz umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

#### **4. Wniosek końcowy**

W oparciu o przeprowadzoną ocenę stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mariusza Opałki pt. **Analiza procesu tarcia par metal – polimer podczas rozruchu**, reprezentująca dyscyplinę **budowa i eksploatacja maszyn** (inżynieria mechaniczna), spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej.

*Andrzej Górecki*

