

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Pawlaka  
nt. *Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych  
wytwarzanych metodą druku 3D*

Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Wieleba  
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Piotr Kowalewski

Recenzja została opracowana na podstawie pisma nr W10/D/22/2023 skierowanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 09.03.2023r.

### OMÓWIENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ (TEMATYKA, TYTUŁ, UKŁAD ORAZ TREŚĆ) ZE WSKAZANIEM UWAG MERYTORYCZNYCH ORAZ REDAKCYJNYCH

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Pawlaka, nt. *Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych wytwarzanych metodą druku 3D* podejmuje ważne zagadnienia z obszaru dyscypliny *budowa i eksploatacja maszyn* (obecnie *inżynieria mechaniczna*) w zakresie badań właściwości tribologicznych materiałów polimerowych stosowanych do wytwarzania przyrostowego elementów trących z wykorzystaniem druku 3D, celem poprawy ich właściwości tarciovo-zużyciowych.

Przedmiotem badań był wybrany materiał polimerowy – poliaktyd (PLA) niemodyfikowany oraz modyfikowany dwoma dodatkami tj. dwusiarczkiem molibdenu oraz grafitem. Do wytworzenia próbek została wykorzystana technologia przyrostowa *Fused Deposition Modelling* (FDM), zwana również *Fused Filament Fabrication* (FFF), która jest obecnie szeroko stosowana w produkcji małej i średnioseryjnej, a wyroby charakteryzuje wysoka jakość wytworzenia. Zainteresowany tematyką technologii przyrostowych oraz stosowanych rozwiązań materiałowych na filament do wytwarzania wyrobów w procesie druku 3D, mgr inż. Wojciech Pawlak przeprowadził przegląd literatury w ramach podjętego tematu rozprawy doktorskiej. Zidentyfikował lukę badawczą, dotyczącą m.in. braku badań wpływu dodatków modyfikujących na właściwości tribologiczne poliaktydu, którą to postanowił uzupełnić realizując kolejne etapy planu badań. Uzyskane wyniki pokazały, że dobór dodatków modyfikujących, ich kombinacja oraz procentowy udział wagowy odgrywa istotne znaczenie w kształtowaniu właściwości funkcjonalnych elementów trących, wytwarzanych przyrostowo z wykorzystaniem druku 3D, a dokładniej technologii FFF/FDM. Można zatem stwierdzić, że tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Pawlaka wpisuje się w obszar aktualnie prowadzonych prac badawczo-aplikacyjnych, przede wszystkim w zakresie poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych na filament do wytwarzania przyrostowego elementów trących, a otrzymane wyniki pozwalają na ich zaimplantowanie do praktycznych zastosowań, jako rozwiązanie pozytywnie wpływające również na środowisko naturalne.

**Tytuł jednoznacznie oddaje tematykę rozprawy doktorskiej, która jest aktualna, a materiał w niej przedstawiony stanowi oryginalny wkład do dyscypliny *budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna)*, obejmując rozważania teoretyczne i prace doświadczalno-analityczne w zakresie materiałów polimerowych modyfikowanych dodatkami, celem poprawy właściwości tribologicznych elementów trących wytworzonych przyrostowo z wykorzystaniem druku 3D oraz zminimalizowania negatywnego oddziaływania materiałów polimerowych na środowisko naturalne.**

Rozprawa doktorska liczy łącznie 148 stron, obejmując: stronę tytułową (1 strona), podziękowania (1 strona), streszczenie w języku polskim (2 strony) i angielskim (2 strony), spis treści (2 strony), rozdział pierwszy - wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń (3 strony), rozdział drugi – wprowadzenie (1 strona), rozdział trzeci – przegląd literatury (64 strony), rozdział czwarty – cel i zakres pracy (1 strona), rozdział piąty – metodyka badań i materiały (6 stron), rozdział szósty – badania tribologiczne (26 stron), rozdział siódmy – badania uzupełniające (24 strony), rozdział ósmy – podsumowanie (5 stron), rozdział dziewiąty – wnioski końcowe (2 strony), rozdział dziesiąty – wykaz literatury (8 stron – łącznie 133 pozycje). Poza tym, przedstawiono 98 rysunków oraz 23 tabele, które w większości wykonane zostały starannie, w przejrzysty sposób ilustrując opisy zawarte w treści opracowania.

**Stronę redakcyjną rozprawy doktorskiej oceniam w ogólnym ujęciu pozytywnie.** Ze względu na zdarzające się różnego rodzaju błędy (w tym stosowanie potocznego języka), w ramach opracowanej recenzji zobowiązana jestem do wskazania tych, które uważam za istotne, stanowiące wskazówkę dla mgr inż. Wojciecha Pawlaka do przygotowania prac naukowo-badawczych w przyszłości.

W dalszej części recenzji, **po syntetycznym scharakteryzowaniu każdego rozdziału, przedstawiam uwagi krytyczne, edytorskie i pytania**, które nasunęły się w czasie lektury rozprawy doktorskiej. Podczas publicznej obrony mgr inż. Wojciech Pawlak zostanie poproszony do ustosunkowania się do wybranych (pogrubiona czcionka) uwag i udzielenie odpowiedzi na zadane pytania.

**Streszczenie** zamieszczone na początku rozprawy doktorskiej, prezentuje syntetyczny opis zakresu pracy. W szczególności wymieniono materiały, z których metodą wtrysku oraz metodą przyrostową FFF/FDM wykonano badane próbki. Wymieniono badania, które zostały przeprowadzone a uzyskane wyniki zaprezentowane w kolejnych rozdziałach rozprawy doktorskiej. Podsumowując wnioski zawarto w dwóch ostatnich akapitach *Streszczenia*.

Rozdział pierwszy **Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń** przedstawia, zgodnie z tytułem, wykaz stosowanych w treści rozprawy doktorskiej skrótów i oznaczeń.

#### **UWAGI KRYTYCZNE, EDYTORSKIE I PYTANIA**

- Streszczenie powinno się raczej zamieszczać na końcu rozprawy doktorskiej. Jego treść powinna stanowić syntetyczny opis tematyki, celu i zakresu pracy, a także zawierać główne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz oraz podsumowanie.
- Wymieniając rodzaje badań realizowanych w ramach rozprawy doktorskiej należało napisać „Przygotowane próbki poddano badaniom, obejmującym: badania tribologiczne na stanowisku z węzłem tarcia typu pin-on-disc,... badania wpływu chropowatości powierzchni przeciwpółki (dysku) na właściwości tarciovo-uzyciowe skojarzenia tribologicznego, badania morfologii powierzchni wytworzonych (przed badaniami tarciovo-uzyciowymi) i eksploatowanych (po badanich tarciovo-uzyciowych) z wykorzystaniem SEM...”.
- W treści rozdziału zdarzają się zbyt długie zdania, błędy edytorskie, stylistyczne oraz interpunkcyjne, np. „W niniejszej pracy autor skupił się na... możliwości zastosowana... oraz wpływowi dodatków...”, „Z kolei wytrzymałość na zginanie, znacząco i obniżyła się dla wszystkich próbek...”
- Wykaz skrótów ograniczony został do rozwinięcia nazw z języka angielskiego; brakuje wyjaśnienia/rozdzielenia rodzajów technologii przyrostowych.

Rozdział drugi *Wprowadzenie* przedstawia syntetyczny opis zagadnień obejmujący tematykę rozprawy doktorskiej, w tym technologię druku 3D (w ogólnym ujęciu) oraz technologię FFF/FDM. W ostatnim akapicie tego rozdziału mgr inż. Wojciech Pawlak wskazuje luki badawcze, jednocześnie krótko uzasadniając wybór podjętego tematu rozprawy doktorskiej.

#### UWAGI KRYTYCZNE, EDYTORSKIE I PYTANIA

- Rozdział powinien zawierać informacje dotyczące szczegółowego uzasadnienia podjętej tematyki rozprawy doktorskiej, poruszając najważniejsze zagadnienia. Tymczasem przedstawiony opis jest bardzo syntetyczny i niekompletny, napisany częściowo potocznym językiem.
- Co oznacza pojęcie „zwykli ludzie”? Czym „zwykli ludzie” różnią się od inżynierów czy naukowców?
- W treści rozdziału zdarzają się błędy edytorskie, stylistyczne oraz interpunkcyjne (np. „Główne wyzwania to jakość produktów, jak również obciążenie środowiska naturalnego”, „... co spowodowało większą ilością publikacji naukowych w tym obszarze”).

Rozdział trzeci *Przegląd literatury* składa się z dziewięciu podrozdziałów, tj.: historia technologii przyrostowych (3.1.), nowoczesne technologie przyrostowe (3.2) – ogólny opis sześciu technologii przyrostowych (3.2.1 – 3.2.4) oraz ich zwarte porównanie (3.2.5), materiały stosowane w technologii FFF/FDM (3.3 i 3.4), zastosowanie technologii FFF/FDM (3.5), tribologia materiałów polimerowych (3.6), napelniacze poprawiające właściwości tribologiczne polimerów (3.7) oraz tribologia w technologii FFF/FDM (3.8). Przedstawiono w nim istotne, zdaniem mgr inż. Wojciecha Pawlaka, a dotyczące tematu rozprawy doktorskiej zagadnienia, wskazując luki badawcze, które postanowiono uzupełnić poprzez realizację zaplanowanych prac doświadczalno-analitycznych. Istotną część rozdziału trzeciego stanowi ostatni podrozdział (3.9) – podsumowanie przeglądu literatury, w którym przedstawione zostało m.in. uzasadnienie podjętego tematu rozprawy doktorskiej „... autor przedstawi próby znalezienia nowych rozwiązań z uwzględnieniem powyższych wyzwań stawianych naukowcom przez nowe technologie oraz ekologię”.

#### UWAGI KRYTYCZNE, EDYTORSKIE I PYTANIA

- Tytuł rozdziału powinien brzmieć „Analiza literatury w zakresie podjętej tematyki”
- Strony 5-6. Co oznaczają zastosowane pojęcia „międzyczas” czy „rewolucja tzw. reparałów”? Czym jest „prawdziwy początek”? Kim są „domorośli konstruktorzy”? Jednocześnie zwracam uwagę, że to potoczne sformułowania, które nie powinny się znaleźć w opracowaniu naukowym jakim jest rozprawa doktorska.
- Strona 6, zdanie „Metoda FFF stawała się coraz bardziej popularna, co przełożyło się na wzrost ilości zastosowań technologii przyrostowych w innych dziedzinach, takich jak: medycyna, inżynieria biomedyczna, prototypowanie, architektura, sztuka, rozrywka, produkcja...” – Brakuje podania konkretnych przykładów tego zastosowania.
- Strona 8, zdanie „Dzięki czemu można uzyskać zdecydowanie lepszą jakość powierzchni, zbliżoną do standardowej.” – Co oznacza „standardowa” jakość powierzchni, jaka jest miara i wartość tej miary?
- Strony 10-11, zdanie „Wysoka dokładność wykonywanych modeli, zapewniana przez technologie, powoduje, iż odnajdują one zastosowanie w takich branżach jak jubilerstwo czy stomatologia.” – Co znaczy „wysoka dokładność” oraz gdzie w stomatologii stosowana jest technologia DLP?
- Strona 12, punkt 3.2.4. Skoro zaletą technologii CJP jest możliwość druku w pełnej gamie kolorystycznej, a wadą jest mała wytrzymałość, to jakie praktyczne zastosowanie może mieć technologia CJP?
- Strona 13, zdanie „Połączenie wyżej wymienionych specyficznych możliwości SLS,... sprawia, że technologia ta jest szeroko wykorzystywana w przemyśle samochodowym i lotniczym.” – Brakuje podania informacji, gdzie konkretnie SLS jest stosowana, do wytwarzania jakich części?
- **W podrozdziale 3.3 przedstawiono materiały stosowane w technologii FFF/FDM, ale nie podano uzasadnienia, dlaczego akuratnie tej technologii poświęcono uwagę w tym oraz kolejnych podrozdziałach.**
- Strona 16, zdanie „... ABS z powodzeniem znajduje zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz...” – Brakuje podania konkretnych przykładów tego zastosowania.
- Strona 17, zdanie „TPU znajduje zastosowanie w motoryzacji, przemyśle obuwniczym, a także...” – Brakuje podania konkretnych przykładów tego zastosowania.

- Tabele 1-6. Podając w tytule tabeli, o który materiał chodzi, niepotrzebnie wpisano nazwy kolumn „nazwa materiału” oraz materiał. Powinno być raczej „właściwość” oraz „wartość”.
- Podrozdział 3.4 *Polilaktyd (PLA)*. Ponieważ PLA jest jednym z materiałów stosowanych w technologiach przyrostowych, jego ogólna charakterystyka, podobnie jak to wykonano dla pozostałych pięciu materiałów, powinna się znaleźć w podrozdziale 3.3. Natomiast, po uzasadnieniu wyboru przedmiotu badań, szerszy opis należało zamieścić w części rozprawy doktorskiej *Metodyka badań i materiały* (rozdział piąty).
- Podrozdział 3.4. Opisując proces wytwarzania, należało podsumować punkt 3.4.1. Pisząc o właściwościach mechanicznych, dobrze byłoby wymienić, o które właściwości chodzi (punkt 3.4.2). Pisząc o zastosowaniu (punkt 3.4.3) stosuje się raczej określenie „wyroby”, a nie „artykuły” biomedyczne. Zdanie na stronie 26 (punkt 3.4.5) „Niemniej jednak jest to problem coraz częściej poruszany w branży recyklingowej ... i przewiduje się, że w najbliższej przyszłości instalacje służące zarówno do recyklingu jak i biodegradacji [58].” nie ma sensu. Strona 27 – co oznacza PLLA oraz „utrata ciężaru cząsteczkowego”? Zdanie „Obecnie celem badaczy jest kompletowanie listy bakterii oraz enzymów mogących wspierać proces biodegradacji...” – Na jakim to jest etapie, jakie źródła podają takie informacje?
- Strona 29. Co oznacza HPC?
- Strona 34. Co oznacza ISS?
- Strona 34, akapit „Jednym, z rezultatów badań było wydrukowanie klucza... Ponadto, NASA określiła szacunkowy koszt wyniesienia na orbitę...” – Nie jestem przekonana na ile informacje zawarte w tym akapicie są znaczące dla rozprawy doktorskiej i potrzebne? Poza tym nic z tego nie wynika - brak konkluzji związanej z tym akapitem.
- Punkt 3.6.1. Po opisie wybranych teorii tarcia suchego zabrakło podsumowującego akapitu.
- Punkt 3.6.2. powinien brzmieć *Zużywanie tribologiczne polimerów* jako kontynuacja opisywanych zagadnień dot. materiałów polimerowych. Zamiast używać określenia „procesów” lepiej używać określenia „mechanizmów” zużywania. Poza tym opisując zużywanie adhezyjne, należy przedstawić kolejne jego etapy/rodzaje. Przy opisie zużywania zmęczeniowego, należy podać różne jego rodzaje. Zabrakło ilustracji, przedstawiających poszczególne mechanizmy zużywania. Po opisie wybranych mechanizmów zużywania zabrakło podsumowującego akapitu.
- Strona 39, zdanie „Główną przyczyną tych różnic jest... która to poza oczywistym zużywaniem cieplnym, może powodować też inne rodzaje zużywania bądź też nawet degradacji polimeru.” jest niezrozumiałe.
- Strona 40, akapit „Zachodzić ono może w wyniku chropowatości metalowej powierzchni,...” jest niezrozumiałe. O jaki wynik chropowatości chodzi? Poza tym, w tym samym akapicie czytamy „Znamienne jest również to, iż zbyt wysoka gładkość powierzchni może powodować zużywanie adhezyjne.” – Z czego to wynika, jaki jest przebieg zużycia?
- Strona 42, zdanie „Nacisk jednostkowy, ze względu na ogrom czynników mających wpływ na rzeczywistą powierzchnię styku takich jak np. temperatura,...”. Jakie inne spośród „ogromu czynników” można wymienić poza temperaturą?
- Strony 42-44, rysunki 28-29, wraz z opisem. Co oznaczają PA6, POM, PSU, PET, PEEK etc.? W jakich warunkach (bez smarowania, ze smarowaniem) zostały przeprowadzone badania? Poza tym, którego elementu węzła tarcia (próbki czy przeciwpróbki) dotyczyła podana wartość parametru *Ra*?
- Strony 44-45, rysunki 30-31. Co oznaczają PA66, POM, PE-HD, PTFE? W jakich warunkach (bez smarowania, ze smarowaniem) zostały przeprowadzone badania?
- Podrozdział 3.7 powinien brzmieć *Dodatki modyfikujące właściwości tribologiczne polimerów*.
- Strona 51, Tabela 7. W treści rozprawy doktorskiej brakuje odniesienia oraz komentarza do tej tabeli.
- Podrozdział 3.8 przedstawia wyniki prac różnych zespołów badawczych w zakresie badań tribologicznych elementów wytworzonych w technologii FFF/FDM. Tematyka tych prac jest zgodna z tematyką rozprawy doktorskiej. W jaki sposób te wyniki przekładają się na zakres badań realizowanych przez mgr inż. Wojciecha Pawlaka? Brakuje w podsumowaniu każdej publikacji informacji, w jaki sposób prezentowane parametry badań oraz wyniki znajdują odzwierciedlenie w planowanym programie badań?
- Strona 54, zdanie „Kolejny wykres przedstawiony na rysunku 37 obrazuje porównanie wyników wskaźnika zużycia objętościowego dla badanych materiałów” – Co oznacza „wskaźnik zużycia objętościowego”?
- Strony 54-55, zdanie „Autorzy dowodzili, iż było to spowodowane sprawniejszym wypełnianiem nierówności powierzchni poprzez efekty zużywania.” – Co znaczy „sprawniejsze wypełnianie nierówności powierzchni poprzez efekty zużywania”? Na czym to polega oraz czym są efekty zużywania?
- Strony 55 i 59. Czym podyktowana była chropowatość powierzchni tarczy wykonanej ze stali C45 określona parametrem *Ra*, 0,3-0,4  $\mu\text{m}$  oraz 0,35-0,45  $\mu\text{m}$ ?

- Strona 64, zdanie „Tabela 10 przedstawia wyniki badań współczynnika tarcia oraz wskaźnik zużycia.” – Czym jest wskaźnik zużycia?
- W treści rozdziału zdarzają się zbyt długie zdania, błędy edytorskie, stylistyczne oraz interpunkcyjne, a także potoczny język (np. międzyczas, niebagatelne, owocuje, bić rekordy popularności, najżywiej, etc.).

Rozdział czwarty ***Cel i zakres pracy*** po krótkim wstępie przedstawia cel naukowy pracy oraz dwa cele użytkowe.

#### UWAGI KRYTYCZNE, EDYTORSKIE I PYTANIA

- Pomimo zapowiedzi w tytule rozdziału czwartego, brakuje w nim zakresu pracy, jak również programu badań i analiz, który prezentowałby ten zakres.
- Biorąc pod uwagę przeprowadzone badania, zaprezentowane w kolejnych rozdziałach rozprawy doktorskiej, cel naukowy pracy należałoby bardziej uszczegółowić, podając warunki badań.
- Podobnie, w przypadku określenia celów użytkowych pracy, należało podać o jaki rodzaj modyfikacji badanego materiału PLA chodzi oraz który rodzaj materiału i w jakich warunkach pracy mógłby znaleźć praktyczne zastosowanie.
- Brakuje podsumowania tego rozdziału, które stanowiłoby płynne przejście do kolejnego rozdziału rozprawy doktorskiej.

Rozdział piąty ***Metodyka badań i materiały*** przedstawia: uzasadnienie wyboru badanych materiałów, w oparciu o przesłanki – ekologiczną, technologiczną, ekonomiczną i dostępności (5.1), badane próbki wytworzone w trzech kształtach – cylinder, wiśośko i belka (5.2) oraz metodykę analizy statystycznej (5.3).

#### UWAGI KRYTYCZNE, EDYTORSKIE I PYTANIA

- Tytuł rozdziału nie odzwierciedla dosłownie tego, co zawiera treść rozdziału. Brakuje charakterystyki badanego materiału PLA, która została przedstawiona w podrozdziale 3.4. Brakuje również, poza programem badań i analiz, opisu stanowisk badawczych. Poza stanowiskiem do badań tarcio-zużyciowych z węzłem tarcia typu *pin-on-disc* (opis zawarto w podrozdziale 6.1), brakuje opisu stanowisk wykorzystywanych do pozostałych badań, których wyniki prezentują rozdziały szósty i siódmy.
- Strona 71. Opis technologii wytwarzania badanych materiałów można było przedstawić w formie schematu/algotymu, który wskazywałby kolejne jego etapy.
- Strona 72, Tabela 11. W jaki sposób zweryfikowano zawartość grafitu oraz MoS<sub>2</sub> w przygotowanych do badań próbkach?
- Podrozdział 5.3, pierwsze zdania „Dla podstawowych badań tribologicznych przeprowadzono pomiary czterech próbek polimerowych.”, „W sytuacji, gdy... lub gdy próbka nie osadzała się prawidłowo na przeciwelemencie...” – Jakie rodzaje badań tribologicznych były realizowane, które traktowane są jako badania tribologiczne podstawowe? Które i dlaczego te cztery próbki polimerowe badano? O jaki rodzaj „osadzania na przeciwelemencie” chodzi?
- Brakuje podsumowania tego rozdziału, które wskazywałoby na to, co wynika z przedstawionych opisów, jednocześnie stanowiąc płynne przejście do kolejnego rozdziału rozprawy doktorskiej.
- W treści rozdziału zdarzają się błędy edytorskie, stylistyczne oraz interpunkcyjne.

Rozdział szósty ***Badania tribologiczne*** rozpoczyna wprowadzenie, które wyjaśnia zakres badań tribologicznych i przedstawia rodzaje badanych próbek. Następnie, w pięciu podrozdziałach omówiono stanowisko badawcze (6.1) oraz zakres badań – badania tarcia oraz intensywności zużycia (6.2), badania wpływu chropowatości przeciwpróbki na właściwości tribologiczne skojarzenia (6.5), a także wyniki tych badań: współczynnika tarcia (6.3), intensywności zużycia (6.4) oraz tarcia i intensywności zużycia w zależności od charakteru ukształtowania przeciwpróbki (6.5.1 i 6.5.2). Na podstawie zrealizowanych badań doświadczalnych opracowano wnioski zaprezentowane w podrozdziale podsumowującym (6.6).

#### UWAGI KRYTYCZNE, EDYTORSKIE I PYTANIA

- Podrozdział 6.1, w którym opisano stanowisko do badań tarciovo-zużyciowych, powinien się znaleźć w rozdziale piątym, zatytułowanym *Metodyka badań i materiały*.
- Strona 78, zdanie „Powierzchnia robocza tarczy została obrobiona do  $Ra$  0,35-0,45  $\mu\text{m}$  ( $Ct = 0,25$ ;  $Lm = 1,25$ )”. Dlaczego powierzchnia tarcz miała taką charakterystykę powierzchni  $Ra$ ? W jaki sposób została zmierzona chropowatość, ile pomiarów/profilii wykonano?
- Strona 78, zdanie „W celu określenia parametrów badania, przeprowadzone zostały wstępne próby przy wyższych obciążeniach i prędkościach” – Brakuje informacji jakie były wartości obciążeń i prędkości.
- Strona 78, zdanie „Wartości parametrów przedstawione mogą być interpretowane jako stosunkowo małe, względem typowych wartości używanych w tego typu badaniach”. To zdanie jest niezrozumiałe. Poza tym, brakuje informacji dot. „typowych wartości używanych w tego typu badaniach”.
- Strona 79, zdanie „... Moment ten identyfikowany był przy pomocy lusterka oraz lupy” – W jaki sposób i co przez tego typu sprawdzanie chciano uzyskać?
- Strona 80, zdanie „... autor po każdym badaniu robił zdjęcie przeciwpróbki w celu dokumentacji produktów zużycia” – jakie urządzenie zostało wykorzystane do wykonania zdjęcia powierzchni?
- W opisie badań tribologicznych brakuje informacji o liczbie powtórzeń, co jest istotne z punktu widzenia oceny powtarzalności oraz uzasadnienia dla wyników przedstawionych w Tabeli 14.
- Strona 83, zdanie „W każdym wypadku nagrzewanie próbki trwało do 22 minut.” – w jaki sposób kontrolowano temperaturę próbki?
- Strona 83, zdanie „... PLA niemodyfikowane wtrysk (rysunek 54) oraz PLA + 1%  $\text{MoS}_2$  + 1% grafit charakteryzowały się podobnym charakterem przebiegu współczynnika tarcia, który uznać można za najmniej zmienny w przebadanych kompozycji”. Brakuje wykresu obrazującego przebieg współczynnika tarcia dla PLA + 1%  $\text{MoS}_2$  + 1% grafit.
- Strona 89, pierwszy akapit podrozdziału 6.4. Co oznacza symbol „ $\pm$ ”? Poza tym opisany przedział niepewności pomiarowej poniżej 23% odnotowano dla 8 z 10 a nie 7 z 10 badanych materiałów.
- Strona 90, zdanie „Zmianę w postaci znaczącego zwiększenia się intensywności zużywania zaobserwowano dla...” – wśród wymienionych materiałów nie wspomniano o PLA + 1%  $\text{MoS}_2$  + 1% grafit, gdzie również, jak wynika z wykresu na rysunku 57, nastąpił wzrost intensywności zużywania.
- Strona 91, Tabela 16 i opis parametrów badań. Proszę podać w jaki sposób uzyskano trzy różne chropowatości powierzchni tarczy określone parametrem  $Ra$  i dlaczego akuratnie takie zakresy wartości? Na jakim urządzeniu oraz w jaki sposób przeprowadzono pomiar  $Ra$ , ile pomiarów/profilii wykonano? Poza tym brakuje wyników pomiarów w postaci wykresów – profili, obrazujących ukształtowanie powierzchni tarcz. Jak dane w Tabeli 16 korespondują z danymi w Tabeli 13, zwłaszcza w kontekście chropowatości powierzchni tarczy  $Ra$ ?
- Strona 93, zdanie „Niemniej jednak dla najwyższych wartości wyraźny był krótki czas wstępnego ścierania się próbek oraz nagrzewania do temperatury pracy...” – Brakuje konkretnej informacji, o jakich wartościach mowa?
- Podrozdział 6.6. W prezentowanych stwierdzeniach, odnoszono się do uzyskanych w wyniku badań danych, podając liczby całkowite, w przypadku, gdy wartości były większe lub mniejsze od przytoczonych w stwierdzeniach. W pracach takich jak rozprawa doktorska należy podawać konkretne dane, a w przypadku podawania wyników przybliżonych, należy o tym napisać/uzasadnić.
- W niektórych podrozdziałach, zwłaszcza w podrozdziale 6.6 brakuje podsumowania (konkludujących zdań), które wskazywałoby na to, co wynika z przedstawionych opisów/stwierdzeń.
- W treści rozdziału zdarzają się zbyt długie zdania, błędy stylistyczne oraz interpunkcyjne.

W rozdziale siódmym *Badania uzupełniające*, przedstawiono opis badań morfologii powierzchni wytworzonej (przed badaniami tarciovo-zużyciowymi) oraz eksploatowanej (po badaniach tarciovo-zużyciowych). Po krótkim wprowadzeniu, omówiono: badania morfologii powierzchni z wykorzystaniem SEM (7.1), badania produktów zużycia (7.2), badania wytrzymałości na rozciąganie i zginanie (7.3) oraz badania mikrotwardości (7.4). Ostatni podrozdział (7.5) przedstawia syntetyczne podsumowanie zrealizowanych badań uzupełniających.

#### UWAGI KRYTYCZNE, EDYTORSKIE I PYTANIA

- Brakuje informacji dot. urządzenia – skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (typ, moduł) oraz parametrów badań – czy próbki były napyłane, jeśli tak, to czym? Jakie zastosowano powiększenie?

- Przedstawione parametry badań tribologicznych wskazują, że obserwacje morfologii powierzchni dotyczyły elementów węża tarcia w badaniach wg Tabela 13, czego nie napisano w akapicie wprowadzającym.
- Rysunki 66-84. Na większości prezentowanych morfologii powierzchni badanych materiałów nie wskazano charakterystycznych cech, które opisano w treści podrozdziału 7.1. Podobna uwaga dotyczy rysunków 85-94.
- Strona 117, zdanie „Materiały będące przedmiotem tej pracy, w zastosowaniach prowizorycznych czy też prototypowych,...” – Co oznacza „zastosowanie prowizoryczne”?
- W niektórych podrozdziałach brakuje podsumowania (konkludujących zdań), które wskazywałyoby na to, co wynika z przedstawionych opisów/obserwacji.
- W treści rozdziału zdarzają się zbyt długie zdania, błędy stylistyczne oraz interpunkcyjne.

Rozdział ósmy przedstawia **Podsumowanie** rozprawy doktorskiej, w którym zestawiono oraz omówiono wnioski podsumowujące zrealizowane badania, w tym wpływ technologii druku 3D na właściwości tribologiczne, wpływ zastosowanego dodatku MoS<sub>2</sub> na występowanie mechanizmu *stick-slip* oraz mechanizm zużywania się kompozytu, wpływ zastosowanego dodatku grafitu na właściwości tribologiczne (w zależności od udziału %), powstawanie mikrowarstwy grafitu na powierzchni próbek o 10% zawartości grafitu, wpływ MoS<sub>2</sub> oraz grafitu na właściwości wytrzymałościowe, wpływ chropowatości powierzchni przeciwpróbki na charakterystyki tribologiczne oraz wpływ rodzaju zastosowanego dodatku na proces zużywania próbek. Oceniono również możliwości zastosowania badanych rozwiązań (kompozycji) materiałowych do produkcji łożysk ślizgowych.

Rozdział dziewiąty **Wnioski końcowe** stanowi konkluzję rozprawy doktorskiej, przedstawiającą odniesienie do celu naukowego oraz celów użytkowych. Poza tym zaproponowane zostały kierunki dalszych badań, mających na celu rozszerzenie i pogłębienie zagadnień podjętych w ramach tematyki rozprawy doktorskiej.

**Literatura** obejmuje zestawienie łącznie 133 pozycji, w tym 78 książek i artykułów naukowych oraz 55 stron internetowych. Wśród przytoczonych pozycji literaturowych (bez stron internetowych) jest 25 pozycji opracowanych w języku polskim, 53 pozycje w języku angielskim; ponad połowa pozycji została opublikowana w ciągu ostatnich 5 lat. Dobór literatury uważam za poprawny i aktualny. Na uwagę zasługuje powołanie się w rozprawie doktorskiej na opracowania autorskie/współautorskie z udziałem mgr inż. Wojciecha Pawlaka.

## **GŁÓWNE MANKAMENTY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

W recenzowanej rozprawie doktorskiej nt. *Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych wytwarzanych metodą druku 3D*, brakuje płynnego przejścia pomiędzy głównymi rozdziałami oraz podrozdziałami. Odczuwalny jest brak zakresu pracy, chociaż został wymieniony (z nazwy) w tytule rozdziału czwartego, a podany w ogólnej formie jedynie w *Streszczeniu*. Poza tym w treści rozprawy doktorskiej zabrakło schematu planu badań i analiz wraz z opisem, do którego można było nawiązywać realizując kolejne etapy planu badań. Rozdział poświęcony przedmiotowi i metodyce badań powinien zawierać szczegółowy opis badanych materiałów wraz z ich charakterystyką oraz opis metod i urządzeń badawczych wykorzystanych do realizacji planu badań. Tymczasem, albo te informacje znalazły się w innych rozdziałach, albo w ogóle ich nie zamieszczono w treści rozprawy doktorskiej. Ponadto, w rozdziałach prezentujących wyniki i analizę badań własnych, brakuje odniesienia do wyników badań innych autorów (brak dyskusji uzyskanych wyników badań).

## PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska nt. *Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych wytwarzanych metodą druku 3D* podejmuje aktualne zagadnienia, a jej treść przedstawia opracowanie o potencjale aplikacyjnym, dotyczące modyfikowanych dodatkami materiałów polimerowych stosowanych na filament do wytwarzania przyrostowego elementów trących z wykorzystaniem druku 3D. Przedstawiony materiał doświadczalno-analityczny jest oryginalnym dorobkiem mgr inż. Wojciecha Pawlaka, który wpisuje się w zakres dziedziny *nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna)*.

Prace doświadczalno-analityczne podjęte przez mgr inż. Wojciecha Pawlaka pozwoliły na osiągnięcie sformułowanego w rozprawie doktorskiej celu naukowo-badawczego, uzupełniając wiedzę w obszarze badań właściwości tribologicznych oraz mechanizmu zużycia modyfikowanych dodatkami materiałów polimerowych stosowanych w technologii wytwarzania przyrostowego elementów trących.

Przedstawione w rozprawie doktorskiej informacje, badania, analiza wyników oraz wnioskowanie wskazują, że mgr inż. Wojciech Pawlak orientuje się w bibliografii przedmiotu oraz posiada wiedzę i doświadczenie badawcze niezbędne do formułowania i rozwiązywania problemów z potencjałem aplikacyjnym w ramach podjętej tematyki. Zakres prowadzonych badań doświadczalnych oraz interpretacja wyników wskazuje na posiadane umiejętności analityczne. Przedstawiony w rozprawie doktorskiej zakres badań jest uzasadniony, stanowiąc przyczynek do ich kontynuowania w ramach dalszej działalności badawczo-aplikacyjnej mgr inż. Wojciecha Pawlaka.

Część z przedstawionych w recenzji rozprawy doktorskiej uwag ma charakter polemiczny i nie wpływa na ocenę merytoryczną poziomu jej opracowania. W związku z tym, rozprawę doktorską mgr inż. Wojciecha Pawlaka w ogólnym odbiorze oceniam pozytywnie.

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Pawlaka nt. *Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych wytwarzanych metodą druku 3D* spełnia w wystarczającym stopniu wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony w ramach dyscypliny naukowej *inżynieria mechaniczna*.