

Dr hab. inż. Monika Madej, prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Eksploatacji, Technologii Laserowych
i Nanotechnologii
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
27-314 Kielce

RECENZJA rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha PAWLAKA
pt. *Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych*
wytwarzanych metodą druku 3D

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

Podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego (W10/D/21/2023) z dnia 9 marca 2023 roku.

1. Uzasadnienie podjętego problemu

Wytwarzanie przyrostowe z wykorzystaniem druku 3D obecnie cieszy się dużym zainteresowaniem badaczy oraz zdobywa coraz szersze zastosowanie przemysłowe. Wynika to z możliwości stosowania rozwiązań proekologicznych mających na celu znacząco zredukować odpady i zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Badania wskazują na możliwość wykorzystania druku 3D w masowej produkcji. Jest to dziedzina stale rozwijająca się, a większość problemów dotyczących tej tematyki pozostaje obecnie w fazie badań. Jednak na obecną chwilę technologia druku 3D jest zbyt kosztowna do wdrożenia w przemyśle.

Problematyka badawcza pracy dotyczy opracowania nowych materiałów na filament, które mogą być pozyskiwane z odpadów. Stanowi to niewątpliwie szansę na pozyskanie i przetwórstwo materiałów z dotychczas niezagospodarowanych odpadów oraz stworzenie zamkniętego cyklu obejmującego: wytworzenie filamentu, wydrukowanie przedmiotu, który po zużyciu będzie poddany recyklingowi, ponowne wytworzenie filamentu.

Autor rozprawy podjął się wykorzystania technologii przyrostowej FDM - *Fused Deposition Modeling*, nazywanej również FFF - *Fused Filament Fabrication* w celu wytworzenia i zbadania poliaktydu niemodyfikowanego oraz modyfikowanego dwoma rodzajami smarów stałych tj. dwusiarczkiem molibdenu i grafitem oraz ich kombinacją. Uważam wybór technologii FDM/FFF za trafny z powodu, iż jest on aktualnie jedną z najczęściej wykorzystywanych metod druku 3D powszechnie stosowaną do tworzenia prototypów, modeli oraz w pełni funkcjonalnych elementów. Ponadto technologia ta charakteryzuje się możliwością wykorzystania szerokiej gamy materiałów oraz wysoką jakością wyrobu finalnego.

W literaturze przedmiotu brakuje danych dotyczących wpływu stosowania materiałów uzyskanych w powszechnie znanych technologiach druku 3D, w tym FDM/FFF na charakterystyki tribologiczne metalowo-polimerowych węzłów tarcia. Dotychczasowe prace wskazują na lukę badawczą w zakresie teoretycznych podstaw wykorzystania druku 3D, a w szczególności technologii FDM/FFF do konkretnych zastosowań technicznych. Stale prowadzone są próby doboru materiałów na drodze eksperymentalnej. Wymusza to ciągłe doskonalenie technologii dedykowanych drukowi 3D oraz materiałów, zarówno tych stosowanych obecnie, jak i poszukiwanie nowych o lepszych właściwościach użytkowych.

Rozprawa nt.: „*Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych wytwarzanych metodą druku 3D*” dotyczy określenia wpływu zastosowanej technologii FDM druku 3D oraz doboru materiałów na właściwości tribologiczne metalowo-polimerowych węzłów tarcia. Problematyka badawcza pracy jest bardzo złożona i związana z wytwarzaniem materiałów inżynierskich przy użyciu technologii FDM/FFF druku 3D oraz charakterystyką właściwości tribologicznych tak uzyskanych materiałów. Elementy systemu tribologicznego narażone są na różnego rodzaju uszkodzenia, a ich trwałość eksploatacyjna zależy przede wszystkim od zastosowanych materiałów współpracujących tarcio.

Biorąc pod uwagę znaczenie i potencjalny zakres problematyki podjętej w pracy przez mgr inż. Wojciecha Pawlaka uważam wybór tematu pracy doktorskiej za trafny i uzasadniony. Recenzowana praca mieści się w dyscyplinie naukowej *Inżynieria Mechaniczna* (wcześniej Budowa i Eksploatacja Maszyn).

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Recenzowana praca ukierunkowana jest na problematykę z zakresu eksploatacji systemów tribologicznych polimerowych elementów ślizgowych wykonanych w technologii druku 3D. Dotyczy badań wpływu dodatków smarów stałych, tj. grafitu, dwusiarczku molibdenu oraz ich kombinacji do materiału bazowego – poliaktydu PLA na właściwości wybranych systemów tribologicznych. Ocenę ich funkcjonowania przeprowadzono na układach modelowych. Tematyka niniejszej rozprawy jest nowoczesna, aktualna i potrzebna.

Układ pracy jest raczej prawidłowy i zgodny z zasadami twórczości naukowej. Dysertacja mgr inż. Wojciecha Pawlaka ma klasyczny układ, tzn. została podzielona na dwie zasadnicze części: teoretyczną oraz doświadczalną.

Po wstępie przedstawiono przegląd literatury i analizę aktualnego stanu wiedzy. Pozostałą część dysertacji stanowią badania własne.

Część teoretyczna wraz z wprowadzeniem obejmuje dwa rozdziały, natomiast badania eksperymentalne zawierające opis zrealizowanych badań wraz z dyskusją wyników i wnioski końcowe kolejne sześć. W pracy zamieszczono ponadto spis treści oraz spis ważniejszych skrótów i oznaczeń. Część związana z wprowadzeniem literaturowym (rozdziały 2-3) stanowi ok. 50 % tekstu, resztę stanowią rozdziały związane z badaniami własnymi Doktoranta.

Praca napisana jest polszczyzną, wykorzystującą mnóstwo wyrażen i zwrotów zaczerpniętych z języka potocznego. Najważniejsze zauważone niezręczności w tym pojęciowe zostały przedstawione w części *Uwagi i Wątpliwości*. Wykaz literatury obejmuje 133 pozycje, związane bezpośrednio z tematem pracy. Wybór literatury uważam za trafny i wyczerpujący.

Rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Pawlaka przedstawiona jest na 141 stronach i zawiera różnorodny materiał ilustracyjny w postaci 98 rysunków, fotografii i wykresów oraz 23 tabel.

Praca poprzedzona jest streszczeniem w języku polskim i angielskim, Uważam, że powinno ono znaleźć się na końcu wskazując na najważniejsze osiągnięcia Doktoranta.

Następnie zawiera 10 rozdziałów, z czego pierwszy stanowi wykaz skrótów, a kolejny wprowadzenie do tematyki przedmiotu.

Rozdział 3 stanowi Przegląd literatury i składa się z 9 podrozdziałów, które złożone są z kolejnych podrozdziałów - Podrozdział 3.2 z pięciu, Podrozdział 3.3. z sześciu, Podrozdział 3.4 z pięciu, Podrozdział 3.5 z sześciu, Podrozdział 3.6 z pięciu, Podrozdział 3.7 z trzech, Podrozdział 3.8. z dwóch, Podrozdziały 3.1 i 3.9 nie posiadają podrozdziałów. Niektórych z podrozdziałów nie uwzględniono w spisie treści.

W Podrozdziale 3.1 Autor przedstawił rys historyczny powstawania technologii przyrostowych m.in. wytwarzania produktów o dowolnym kształcie poprzez spajanie proszków za pomocą wiązki energii.

Następnie Doktorant wskazał zmiany jakie zachodziły w metodach wytwarzania elementów technikami druku 3D na przestrzeni lat oraz scharakteryzował nowoczesne technologie przyrostowe m.in. FFF/FDM, SLS i SLM czy CJP. (Podrozdział 3.2).

W Podrozdziale 3.3 autor opisał materiały znajdujące zastosowanie w technologiach przyrostowych np.: termopolimer akrylonitryl-butadien-styrenow (ABS), termoplastyczny poliuretan (TPUR), wysokoudarowy polistyren (PS-HI), poli(tereftalan etylenu) modyfikowany glikolem (PETG), poliamid (PA) oraz ich właściwości. Ponadto autor poruszył również bardzo ważny aspekt recyklingu i biodegradacji materiałów polimerowych.

W Rozdziale 3.5 Doktorant dość obszernie opisał zastosowanie technologii przyrostowych w różnych gałęziach przemysłu: medycynie, przemyśle kosmicznym, lotniczym oraz rolnictwie.

W Podrozdziałach 3.6 – 3.7 Doktorant poruszył kwestie właściwości tribologicznych materiałów polimerowych. Scharakteryzował je pod kątem tarcia, rodzajów zużycia oraz wpływu parametrów ruchowych oraz temperatury na procesy tribologiczne.

Dodatkowo wskazał jakie dodatki, w postaci smarów stałych (grafit, dwusiarczek molibdenu oraz teflon) wpływają na poprawę właściwości tribologicznych.

Podrozdział 3.8 stanowi opis wyników badań tribologicznych. Określił wpływ parametrów procesu druku 3D oraz dodatków smarnościowych na przebieg zjawiska tarcia w oparciu o dane bibliometryczne. Ponadto zaprezentował wyniki badań w wybranych zastosowaniach praktycznych technologii przyrostowych.

W Podrozdziale 3.9 Autor podsumował zagadnienia omówione w przeglądzie literatury.

Rozdział 4 zawiera cel i zakres pracy. Autor wyznaczył cele naukowe i użytkowe, ale nie przedstawił zakresu badań ani programu badawczego, co zdecydowanie poprawiłoby aspekty naukowe pracy. Wytyczone cele pracy sformułowane przez Doktoranta można podzielić na:

a) *Cel naukowy:*

Zidentyfikowanie procesów tribologicznych zachodzących podczas współpracy elementów ślizgowych wytworzonych z kompozytów PLA metodami przyrostowymi FFF/FDM podczas ich współpracy ze stalą.

b) *Cele praktyczne*

- *wyznaczenie kierunku modyfikacji fizycznej polilaktydu w celu uzyskania materiałów ślizgowych do zastosowań w metodach przyrostowych FFF/FDM,*
- *ocenę możliwości wykorzystania badanych kompozytów na podstawie polilaktydu w prototypowaniu łożysk ślizgowych.*

Cele pracy zostały sformułowane prawidłowo i zawierają przede wszystkim aspekty naukowo-badawcze, które dodatkowo mogą mieć charakter użytkowy.

Rozdział 5 *Metodyka badań i materiały* składa się z trzech Podrozdziałów (5.1. - 5.3). Autor opisuje w nich metodykę prowadzenia badań oraz materiały. Doktorant wykazał, że podczas doboru materiału - polilaktydu PLA, kierował się kryteriami: ekologicznymi, technologicznymi, ekonomicznymi oraz dostępności na rynku. Następnie opisał sposób wytworzenia wszystkich rodzajów próbek oraz metodę analizy statystycznej. Autor poddał badaniom 10 rodzajów próbek, materiałem odniesienia było PLA uzyskane metodą wtrysku oraz za pomocą technik przyrostowych FFF/FDM. Kolejne próbki były modyfikowane grafitem (od 1-10%) oraz dwusiarczkiem molibdenu (1-2.5%) oraz ich kombinacją. W mojej ocenie zabrakło w tym rozdziale szczegółowego opisu. Jednak na podkreślenie zasługuje samodzielne wykonanie filamentów przez Doktoranta.

Rozdział 6 składa się z sześciu Podrozdziałów (6.1 - 6.6), przy czym Podrozdział 6.5 podzielono na 6.5.1 i 6.5.2, których z nich nie uwzględniono w spisie treści. W rozdziale 6 Autor dość obszernie opisał przebieg realizacji badań tribologicznych oraz stanowisko do pomiarów tarcia i intensywności zużycia. W dalszych podrozdziałach przedstawił uzyskane wyniki badań współczynnika tarcia kinetycznego oraz intensywności zużycia. Uzupełnienie badań stanowiły badania chropowatości przeciwelementu na właściwości tribologiczne. Do badań zakwalifikowano po jednej kompozycji z badanych rodzajów materiałów kierując się kryterium najkorzystniejszych parametrów.

mm

Badaniom zostały poddane kompozycje: PLA + 1% MoS₂ oraz PLA + 10% grafit. Rozdział ten został opatrzony podsumowaniem i wnioskami.

Rozdział 7 składa się z pięciu podrozdziałów, przy czym Podrozdział 7.3 dodatkowo podzielono na 7.3.1 oraz 7.3.2, których nie uwzględniono w spisie treści. Rozdział 7 stanowią badania uzupełniające. Obejmowały one: badania powierzchni przed i po tarcia za pomocą SEM, badania produktów zużycia, badania wytrzymałości na rozciąganie i zginanie oraz badania mikrotwardości. Celem tych badań, według Autora, było lepsze zrozumienie mechanizmów zachodzących podczas tarcia dla zaproponowanych kompozytów, a także lepszego poznania właściwości wytrzymałościowych, mających duże znaczenie dla materiałów stosowanych podczas produkcji łożysk.

Wyniki badań opisane w Rozdziałach 6 i 7 zostały podsumowane w Rozdziale 8.

Rozdział 9 stanowią wnioski. Na podstawie wyników badań, uzyskanych w niniejszej pracy Doktorant przedstawił najważniejsze wnioski końcowe, w których zawarł najważniejsze spostrzeżenia zaobserwowane podczas realizacji tej pracy. Podane wnioski mają charakter bardzo szczegółowy. Autor odniósł się w nich do celów pracy.

Rozdział 10 to spis cytowanej literatury. W bibliografii znalazło się 55 pozycji internetowych oraz 26 polskojęzycznych i 52 anglojęzycznych artykułów i książek. Na podkreślenie zasługuje wykorzystanie literatury z ostatnich 10 lat w ilości 44, co stanowi ponad 33%. Autor również wykazał się swoją aktywnością naukową i zacytował 5 prac, których jest współautorem.

Mgr inż. Wojciech Pawlak w pracy doktorskiej podjął się problematyki wykorzystania technologii druku 3D w wytwarzaniu elementów par trących z poliaktydu modyfikowanego grafitem i/lub dwusiarczkiem molibdenu oraz wprowadzeniem ich do systemu tribologicznego. Tytuł recenzowanej rozprawy koresponduje z treścią zawartą w pracy. Objętość rozprawy jest odpowiednia i wynika z potrzeby opisu stanu literatury oraz przeprowadzonych eksperymentów. Rysunki oraz tabele zamieszczone w pracy wykonane są zazwyczaj starannie i przejrzysto. Pod względem formalnym rozprawa została opracowana poprawnie. Jej struktura odpowiada przyjętym zasadom, a treść poszczególnych rozdziałów rozmieszczona jest zgodnie z postawionymi celami.

3. Uwagi i wątpliwości

Podczas zapoznawania się z treścią rozprawy zrodziły się pewne uwagi i wątpliwości. Ze względu na charakter zostały one podzielone na 3 rodzaje: merytoryczne, językowe i edytorskie oraz czytelność przedstawionych wyników.

W trakcie obrony pracy proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do następujących pytań i zastrzeżeń:

- Zabrakło w analizie stanu wiedzy wyrażenia osobistego stosunku Autora do uzyskanych informacji.
- Co miał Pan na myśli pisząc: *Dzięki czemu można uzyskać zdecydowanie lepszą jakość powierzchni, zbliżoną do standardowej.*
- Proszę wyjaśnić pojęcie *rewolucja reparaowa*,

MMack

- W branży addytywnej PS-HI znalazł się ze względu na możliwość zastosowania go jako materiału podporowego. Kluczowa jest tu możliwość rozpuszczania PS-HI w *D-Limonenie*. – Co to jest *D-Limonen*?
- Na Rys. 20. przedstawiono: *Część lazika marsjańskiego stworzona we współpracy NASA oraz Stratasys [81]* - Co to za część?
- Co Pan miał na myśli pisząc na str. 48 *dotatków tribologicznych*? – Chyba dodatków uszlachetniających/smarów stałych.
- Str. 53-54 badania powinny być opisane bardziej szczegółowo. Według mnie powinny się tu znaleźć widoki węzłów tarcia.
- Prace Peng Zhanga były prowadzone przy obciążeniu 1, 5 10 N, a Hanon, Marcziś oraz Zsidai przy 150 N? Jak to ze sobą porównać? Co stanowiło próbkę, a co przeciwpróbkę?
- Str. 54 wysoka niepewność pomiarowa – co to znaczy?
- Str. 55 - *nacisk próbki na tarczę: 0,2–0,6 MPa*. Co stanowiło próbkę, a co przeciwpróbkę. Zazwyczaj w tym skojarzeniu próbka to tarcza, a przeciwpróbka trzpień.
- Str. 82 Rys. 52. *Porównanie wyników pomiarów współczynnika tarcia*. Jaki jest sens fizyczny podawania wartości współczynnika tarcia do 3 miejsc po przecinku.?
- Str. 89 Tabela 15. *Wyniki pomiarów wartości intensywności zużywania...* - Proszę o wyjaśnienie i dokładny opis. Tabela jest dla mnie mało czytelna. Czy jest możliwe, żeby przedział niepewności pomiarowej miał większą wartość niż ΔL_h - intensywność zużywania niemodyfikowane PLA – stal?
- W jaki sposób określano intensywność zużywania?
- W jaki sposób zbadano parametry struktury geometrycznej powierzchni? W pracy nie ma informacji o wykorzystanym urządzeniu badawczym.
- Str. 91 *Zmianie uległy wartości parametru chropowatości próbek Ra oraz czasu trwania oraz długość drogi badania*. - Warto byłoby poddać analizie inne parametry np.: wysokościowe: wgłębienia i wzniesienia.
- Str. 103. W jaki sposób przygotowano próbkę do badań przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej i na jakim mikroskopie je zbadano? Próbki PLA nie przewodzą prądu elektrycznego.
- Str.122 Czy odpowiednio dobrano odpowiednią aparaturę do badań twardości. Dlaczego nie użyto urządzeń dedykowanych do tworzyw sztucznych?
- Jak Pan wytłumaczy zmiany twardości przed i po testach tribologicznych?
- Zabrakło w podsumowaniu dokładnego wyjaśnienia przyczyn uzyskania takich wyników.

Ponadto w pracy niewłaściwie używane są pojęcia oraz występują niedociągnięcia językowe i edytorskie z których najbardziej rażące przedstawiam poniżej:

- *Zwykli ludzie*
- *proces tarcia*, tarcie to zjawisko, a towarzyszą mu procesy zużywania;
- Str. 4. - nie wyjaśniono skrótów, używając ich po raz pierwszy w pracy *FFF/FDM* oraz *PLA*,

- Str. 6 - drugą połowę pierwszej dekady XXI wieku, domorośli konstruktorzy
- Str. 7 - W 2015 roku firma Zortrax posiadała 2% globalnego rynku urządzeń desktopowych w technologii FFF/FDM [11], a w 2017 roku, jeden z najbogatszych Polaków – Michał Sołowow, zdecydował się zainwestować w 3DGence, wykupując 100% udziałów, a branża druku 3D wkroczyła w nowy etap rozwoju,
- Wszystko to jest wynikiem unikalnych możliwości sterowania konstrukcją wewnętrzną gotowego elementu, gdzie wzmacniane są bardziej obciążone regiony, a odchudzane są regiony nieobciążone
- Ponadto, Rymuza wykazuje, że zużywanie adhezyjne materiału polimerowego zależy od modułu sprężystości tego materiału, a także że grubość filmu polimerowego jest zależna od zużycia. – Raczej odwrotnie: zużycie zależy od grubości filmu polimerowego,
- Str. 48 dodatków tribologicznych. 48 – Chyba dodatków uszlachetniających/stosowania smarów stałych/ tworzenia kompozytów,
- Str. 48 Mechanizm smarowania grafitu został opisany w teoriach, które można podzielić na trzy grupy: strukturalno-chemiczne, adsorpcyjne oraz strukturalne [93]. Chyba smarowania grafitem.
- Tabela 8 str. 60 co oznacza, że Średnia intensywność zużywania była niemierzalna?
- Str. 61 ... autorzy zdecydowali się na zastosowanie identycznych parametrów procesu tarcia: prędkość 0,34 m/s, nacisk 5,49 N (0,11 MPa), oraz 3 km drogi tarcia w skojarzeniu z krążkiem stalowym o Ra 0,35–0,45 μm . - Raczej użyłabym sformułowania: warunków prowadzenia testów

Zauważyłam także brak czytelności przedstawionych danych:

- Tabela 7 s. 51 brak konsekwencji - skoro opisane materiały w tabeli grafit, dwusiarczek molibdenu to należało zapisać teflon a nie PTFE
- Str. 58 rys. 42. rodzaje wypełnienia: prostokątne, siatkowe oraz trójkątne tak należało oznaczyć na tym rysunku, a nie w języku angielskim, podobnie jak później w tekście
- Pozycja literatury 131 – autor nie podał pełnego cytowania brak roku publikacji.

Stwierdzam, że Doktorant wykonał pracę, przeprowadził eksperymenty naukowe, dokonał analizy uzyskanych wyników, wyciągnął syntetyczne wnioski oraz przedstawił perspektywy rozwoju tematyki. Tym samym potwierdził swoje doświadczenie praktyczne podczas realizacji zadań badawczych. Przedstawiona powyżej moje uwagi krytyczne mają charakter wskazówek na przyszłość dla Doktoranta, by większą uwagę przywiązywał do treści zawartych w publikacjach naukowych.

Dysertacja dotyczy aktualnej wiedzy i w wielu miejscach wnosi nowe treści o walorach poznawczych i użytkowych. Przedstawiona do recenzji praca doktorska, pomimo mojej krytyki jest opracowaniem naukowym i zawiera wnioski badawcze, które mają znaczenie dla zastosowań aplikacyjnych.

5. Wniosek końcowy

Podjęty przez Doktoranta temat jest ważny dla nauki w zakresie inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem tribologii inżynierskich materiałów polimerowych. Recenzowana rozprawa posiada konstrukcję typową dla prac naukowych bazujących na eksperymencie. Mgr inż. Wojciech Pawlak w rozprawie potwierdza znajomość literatury przedmiotu i procesów tribologicznych ślizgowych elementów polimerowych formowanych technologią druku 3D. Wiedzę tę wykorzystał podczas realizacji badań własnych. Dzięki wykonanym eksperymentom wykazał się znajomością najważniejszych metod badawczych. Doktorant zaplanował i przeprowadził plan badawczy, a postawione w pracy cele naukowe zrealizował uzyskując rezultaty mające znaczenie aplikacyjne.

Po zapoznaniu się z pracą mgr inż. Wojciecha Pawlaka pt. *Procesy tribologiczne w polimerowych elementach ślizgowych wytwarzanych metodą druku 3D* uważam, że spełnia ona wymagania stawiane przez Ustawy z dnia 20 lipca 2019 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.). Dlatego stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Wojciecha Pawlaka do publicznej obrony.

Kielce, 16 maja 2023 roku

Monika Madaj