

prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK  
Wojskowa Akademia Techniczna  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
ul. gen. S. Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa

Warszawa, dn. 11.02.2025 r.

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Gontarz-Kulisiewicz  
pt. „Wpływ konstrukcji polimerowych kół zębatach o zredukowanej masie na trwałość  
przekładni wytwarzanych metodą FFF”**

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, Pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, nr RM-530-04-02/2024 z dnia 27 listopada 2024 r.

### **1. Wstęp**

Wyniki obserwowanego intensywnego rozwoju technik przyrostowych coraz bardziej wpływają na zmniejszenie, a niekiedy zniwelowanie barier stojących przed implementacją tych technik w procesie produkcji elementów maszyn. Zastosowania przemysłowe technologii wytwarzania przyrostowego dotyczy najczęściej części z proszków metalicznych i materiałów polimerowych. Współczesne rozwiązania wytwarzania przyrostowego umożliwiają produkcję elementów o złożonych kształtach z zastosowaniem procesu optymalizacji topologicznej, mającej na celu wytworzenie części wystarczająco wytrzymałych przy użyciu jak najmniejszej ilości materiału, co skutkuje niekiedy znaczącym zmniejszeniem energochłonności i przekłada się na redukcję masy wytwarzanych komponentów. Ma to szczególne znaczenie w przypadku rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystywanych w wybranych gałęziach przemysłu, zaliczanych do high-tech industry, w szczególności w sektorze przemysłu lotniczego, motywując zespoły projektowe na całym świecie do poszukiwań metod modyfikacji geometrii wyrobów, prowadzących do jak najmniejszej ich masy. Problem ten dotyczy oczywiście szerokiej gamy wyrobów, wśród których na wzmożoną uwagę zasługują z pewnością koła zębata stanowiące integralną część każdej przekładni zębataj i będące powszechnie wykorzystywane w przeważającej liczbie rozwiązań układów napędowych. Ponieważ potencjał metod ubytkowych z zakresie optymalnego kształtowania kół zębatach zdaje się wyczerpywać,

dalsze doskonalenie ich konstrukcji z wykorzystaniem metod przyrostowych zdaje się być racjonalnym rozwiązaniem.

W świetle powyższego, podjęcie w recenzowanej pracy doktorskiej badań mających na celu uzyskanie obniżenia masy kół zębatych wykonanych z tworzyw polimerowych z zastosowaniem procesów przyrostowych przez odpowiednią modyfikację konstrukcji tarcz kół, przy jednoczesnym zachowaniu trwałości przekładni, uważam za w pełni uzasadnione.

## 2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Gontarz-Kulisiewicz składa się z 14 rozdziałów, przy czym numery rozdziałów przypisano również streszczeniom w języku polskim i angielskim oraz wykazowi literatury zawierającemu 155 pozycji prac, na które Autorka powołała się w tekście.

Praca na 185 stronach jest bogato ilustrowana rysunkami oraz fotografiami wytworzonych i poddanych badaniom elementów modelowych i kół zębatych, urządzeń przyrostowych oraz aparatury i stanowisk badawczych wykorzystywanych podczas badań własnych. Łącznie w rozprawie zamieszczono 143 rysunki i 19 tabel.

Dwustronicowy *Wstęp*, w którym Doktorantka nakreśliła znaczenie przyrostowych technik wytwarzania w kontekście ogólnoświatowych trendów rozwoju przemysłu i uzasadnia podjęcie badań własnych w zakresie możliwości zastosowania tychże technik do wytwarzania kół zębatych o zmodyfikowanej tarczy, poprzedzony został wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów użytych w pracy.

W rozdziale pierwszym poświęconym analizie danych literaturowych, w sposób syntetyczny na sześciu stronach, w oparciu o 150 pozycji literaturowych dokonany został przegląd opracowań dotyczących powiązań procesu projektowania z procesami wytwarzania i opis zagadnień związanych z produkcją części maszyn z zastosowaniem technik addytywnych, w szczególności w odniesieniu do elementów wytwarzanych z tworzyw termoplastycznych. Koncentrując się na prezentowanych w aktualnych opracowaniach wynikach poszukiwań rozwiązań zwiększających trwałość przekładni zębatych, przy jednoczesnym zmniejszaniu ilości materiału niezbędnego do ich wytwarzania, Doktorantka szczególną uwagę skupiła na wynikach badań numerycznych i doświadczalnych wytrzymałości kół zębatych z materiałów polimerowych - zagadnieniach stanowiących rdzeń obszaru badań własnych. Na podkreślenie zasługuje fakt, że aż 115 z przywołanych w tej części rozprawy publikacji ukazało się w ciągu ostatnich 10 lat.

Wyniki przeprowadzonej analizy danych literaturowych oraz sprecyzowane we wstępie uzasadnienie konieczności podjęcia prac nad modyfikacją geometrii tarczy kół zębatach, jako jednej z dróg obniżenia ich masy przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej sztywności i trwałości, legły u podstaw sprecyzowania w następnym, drugim rozdziale tezy i celu rozprawy. Wspierając się wynikami przeprowadzonych wstępnych badań własnych wyszczególniono tezę w brzmieniu „*Możliwe jest obniżenie masy kół zębatach wykonanych z tworzyw polimerowych z zastosowaniem procesów przyrostowych poprzez odpowiednią modyfikację konstrukcji tarcz kół przy jednoczesnym zachowaniu trwałości przekładni*” i cel pracy, którym jest „... wykonanie porównawczych badań trwałości, z uwzględnieniem temperatury i ciśnienia akustycznego, współpracujących par kół zębatach o zmodyfikowanej konstrukcji tarczy, wytworzonych z materiału polimerowego z zastosowaniem technologii przyrostowej FFF (ang. *Fused Filament Fabrication* - wytwarzanie poprzez wytłaczanie filamentu)”. Oczywiście treść przytoczonego celu w pełni ujmuje zamierzenia Doktorantki, nie mniej zalecana precyzja jego formułowania skłania do dyskusji, czy zamiast „... wykonanie porównawczych badań ...” nie należałoby użyć sformułowania „zbadanie”? W praktyce Doktorantka podjęła się bowiem weryfikacji wybranych właściwości użytkowych kół zębatach o zmodyfikowanej geometrii tarczy, z uwzględnieniem możliwości technologii przyrostowych w zakresie wytwarzania złożonych struktur geometrycznych, realizując przy tym bardzo obszerny zakres badań naukowych teoretycznych i doświadczalnych.

Dominującą część rozprawy stanowi opis wyników badań doświadczalnych, w ramach których Doktoranta zaplanowała między innymi: zaprojektowanie wieńców i piast pary współpracujących ewolwentowych kół zębatach o zębatach prostych oraz opracowanie szeregu konstrukcyjnych wariantów tarcz modeli kół badawczych (w tym o zmniejszonej masie), dokonanie wyboru materiału do wytworzenia zaprojektowanych par kół zębatach na podstawie przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych, wykonanie analizy MES par kół o zredukowanej masie i wytworzenie badawczych par kół zębatach z wytypowanego materiału w technologii FFF. Założono, że zwieńczeniem przyjętego programu badawczego będzie przeprowadzenie prób statycznego obciążenia przekładni i badań trwałości zmęczeniowej opracowanych polimerowych par kół zębatach.

Rozdziały: trzeci, zatytułowany *Charakterystyka konstrukcyjna przekładni i kół zębatach* i czwarty, zatytułowany *Metody wytwarzania kół zębatach i stosowane materiały*, liczące łącznie 22 strony, stanowią kompendium wiedzy w zakresie teorii uzębienia i zaębienia z uwzględnieniem specyfiki kształtowania wieńca, tarczy i piasty kół oraz zawierają opis metod ubytkowych, bezwiórowych i addytywnych wytwarzania wieńca zębatego z różnorodnych

materiałów konstrukcyjnych. W rozdziale czwartym szczególną uwagę zwrócono na procesy wytwarzania przyrostowego ujęte w normie ISO/ASTM DIS 52900, takie jak: fotopolimeryzacja objętościowa, wytłaczanie warstwowe, ukierunkowane stapianie i warstwowy nadruk płynnego materiału, selektywne spiekanie proszku, spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem i laminacja warstwowa przekrojów, umożliwiające uzyskanie konstrukcji lekkich, w tym kół zębatach ze zmodyfikowaną oraz nietypową strukturą tarczy. Podkreślono, że najpowszechniej wykorzystywanymi metodami wytwarzania przyrostowego z wykorzystywanych w badaniach własnych materiałów polimerowych są metody: FFF (Fused Filament Fabrication) i FDM (Fused Deposition Modelling).

Ponieważ geometria wyrobu, wybór materiału i metody jego przyrostowego wytworzenia są bezpośrednio powiązane z metodami modelowania CAD, kolejny piąty rozdział rozprawy poświęcono tym metodom w odniesieniu do będących w centrum zainteresowań Doktorantki kół zębatach. W rozdziale tym, liczącym 11 stron, skoncentrowano się na metodyce modelowania CAD, przedstawiając między innymi w formie graficznej algorytm zawierający etapy procesu modelowania koła zębatego w programach CAD. Wśród metod wykorzystywanych w modelowaniu kół zębatach wymieniono i opisano między innymi metody wykreślenia ewolwenty: ze zbioru punktów na podstawie równań matematycznych ewolwenty z wykorzystaniem oprogramowania zewnętrznego, z użyciem zależności geometrycznych powstałych na zasadzie otaczania prostej bez poślizgu po okręgu zasadniczym i z wykorzystaniem utworzonej powierzchni ewolwentowo-śrubowej. Osobnej analizie poddano metody odwzorowania krzywej przejściowej u podstawy zęba i zarysów wrębów. Wnioski z przeprowadzonych rozważań skłoniły Autorkę do wykorzystania podczas kształtowania uzębienia kół walcowych o zębach prostych, stanowiących przedmiot badań, generatora kół zębatach programu Autodesk Inventor.

Zdefiniowany wcześniej cel pracy i jednoznacznie sformułowany zakres badań legły u podstaw nakreślenia w rozdziale szóstym, liczącym pięć stron, planu badawczego pracy doktorskiej, obejmującego zakres badań wstępnych, zasadniczych, jak i weryfikacyjnych.

Zasadniczą część rozprawy, w której zawarto wyniki badań doświadczalnych, otwiera rozdział siódmy, poświęcony opisowi geometrii współpracujących par kół zębatach o zredukowanej masie, zamodelowanych z wykorzystaniem programu Autodesk Inventor w oparciu o geometrię kół bez modyfikacji wieńca. Część parametrów zaprojektowanej pary współpracujących kół zębatach wynikała z geometrii stanowisk badawczych przystosowanych do przeprowadzenia badań wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych, lecz większość

z nich przyjęto na podstawie danych literaturowych. Zachowując przyjęte stałe parametry kół zębatych wynikające z przyjętych granic modyfikacji geometrii tarczy koła, zdefiniowano geometrie tarczy współpracujących par kół, dzieląc je na dwie grupy – klasyczne i alternatywne. Łącznie wytypowano do badań doświadczalnych jedenaście par kół o zróżnicowanej geometrii tarcz, których badania, w zamyśle Doktorantki, miały dać odpowiedź na pytania: w jakim stopniu powierzchnie wybrań stosowanych w kołach wykonanych ze stopów metali wpływają na trwałość współpracujących kół polimerowych? oraz jaki maksymalny ubytek masy można uzyskać podczas wytwarzania przyrostowego pary polimerowych kół zębatych o zróżnicowanej geometrii tarczy?

Wyboru materiału na badane koła dokonano w grupie sześciu polimerów: ABS, PLA, HABS, PC/ABS, UniHIPS i S&S, z których wytworzono techniką FFF próbki modelowe do wytrzymałościowych badań porównawczych w postaci statycznych prób osiowego rozciągania i statycznego skręcania. Wyniki tych badań zamieszczono i poddano interpretacji w rozdziale ósmym, liczącym 27 stron. W zakresie badań wytrzymałościowych uwzględniono również gęstość materiału wytworzonych próbek modelowych o strukturze kratkowej, wynoszącą: 13%, 15%, 20%, 65%, 80%. Oprócz tego badaniom poddano próbki o całkowitym wypełnieniu. Na podstawie uzyskanych wyników wykonanych badań właściwości mechanicznych, jako materiał prototypowy do wytworzenia w technologii FFF zaprojektowanych konstrukcji kół zębatych o zredukowanej masie wybrano polimer ABS.

W rozdziale dziewiątym, liczącym 19 stron, zamieszczono wyniki nieliniowej analizy MES opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych par kół zębatych o zredukowanej masie, zarówno w grupie rozwiązań klasycznych, jak i alternatywnych – wytworzonych z wykorzystaniem techniki przyrostowej FFF. Analizy tej dokonano w środowisku programu Autodesk Inventor Nastran 2021, a wyniki obliczeń przedstawiono w postaci rozkładów naprężeń zredukowanych, wyznaczonych na podstawie hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa-Hencky'ego. W grupie rozwiązań klasycznych rozpatrzono tzw. zębnik bazowy i cztery zębniiki o zredukowanej masie, natomiast w grupie rozwiązań alternatywnych – sześć zębniików o zredukowanej masie. Przeprowadzona analiza MES nie dostarczyła wyników umożliwiających wytypowanie konstrukcji tarczy zębniika o najlepszych właściwościach wytrzymałościowych. Doktorantka podjęła zatem próbę oceny efektywności wprowadzonych modyfikacji geometrii badanych tarcz zębniików na podstawie wyników serii stanowiskowych badań wytrzymałościowych i pomiarów czasu oraz kosztów wytworzenia współpracującej pary kół zębatych. Wyniki tej części badań doświadczalnych zamieszczono w liczącym 49 stron rozdziale dziesiątym, zatytułowanym *Badania stanowiskowe*. Zasadniczą część badań

wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych poprzedzono wytworzeniem na urządzeniu prototypującym Prusa i3 MK3, w technologii FFF, przedmiotu badań w postaci serii współpracujących kół zębatach. W oparciu o wyniki badań wytrzymałościowych materiałów prototypowych, opisanych w rozdziale ósmym, koła wykonano z polimeru ABS stosując strukturę wewnętrzną w postaci kratki z pełnym wypełnieniem, wprowadzając trzy zewnętrzne obrysy. Warty podkreślenia jest wyposażenie zastosowanej drukarki w zaprojektowaną i zbudowaną komorę termoizolacyjną zapewniającą zachowanie stałych parametrów procesu przyrostowego wytwarzania. Do celów badawczych wytworzono jedenaście wariantów konstrukcji par kół zębatach – po dziesięć par w każdym wariantcie, z których po pięć par przeznaczono na stanowiskowe badania statyczne i zmęczeniowe. Oceny całkowitych kosztów wytworzenia rozpatrywanych kół zębatach dokonano na podstawie pomiaru czasu druku – mającego przełożenie na jednostkowe zużycie energii elektrycznej oraz masy zużytego materiału – związanej z kosztami zakupu filamentu. Wyniki przeprowadzonej analizy kosztów Doktorantka przedstawiła w postaci zestawienia tabelarycznego i wykresu słupkowego, z których wynika jednoznacznie, że głównym czynnikiem wpływającym na koszt wytworzenia pojedynczej pary współpracujących kół zębatach na urządzeniu prototypującym Prusa i3 MK3 w technologii FFF jest masa zużytego materiału.

Badania wytrzymałości statycznej przeprowadzono na stanowisku do prób wytrzymałościowych elementów modelowych przystosowanym do badań par kół zębatach. W trakcie badań rejestrowano dane w postaci kąta skręcenia i momentu obciążającego koło czynne. Nie jest natomiast jednoznaczna informacja dotycząca prędkości obrotowej prowadzonych prób wytrzymałościowych, która według Doktorantki wynosiła 0,5 obr./min. Celem statycznych badań stanowiskowych było wyznaczenie rzeczywistej wytrzymałości kół do chwili ich uszkodzenia na skutek zadanego obciążenia statycznego momentem skręcającym. Charakterystyczne cechy uszkodzeń powstałych podczas prowadzonych badań statycznych zilustrowano na licznych zbiorze fotografii obiektów badań i opisano dokonując jednocześnie interpretacji obserwowanych zjawisk. Analizę porównawczą zarejestrowanych maksymalnych wartości momentu obciążającego parę współpracujących kół i odpowiadających im kątów skręcenia w chwili uszkodzenia przeprowadzono w oparciu o wartości średnie tych wielkości, wyliczone dla każdej serii badań kół zębatach o określonej konstrukcji. Zestawienie tych wartości, zarówno momentów, jak i kątów skręcenia, przedstawiono w postaci zestawienia tabelarycznego i wykresu słupkowego, co z uwagi na znaczącą liczbę czynników mających wpływ na charakter obserwowanych uszkodzeń i liczną grupę jedenastu wariantów konstrukcji kół, ułatwiło dokonanie kompleksowej oceny uzyskanych wyników.

Na podstawie zebranych danych wykonano zbiorczy wykres dla pojedynczych omawianych par kół zębatach (rys. 10.23). Pary kół PK5, PA2 i PA6 należały do grupy par kół o najmniejszej wytrzymałości w odniesieniu do maksymalnego momentu obciążającego. Wytrzymałość par kół PK2, PK4, PA1 i PA4, w aspekcie wartości zadanego momentu, była zbliżona. Parą kół, dla której uzyskane wyniki badań statycznych były najbardziej zbliżone do danych uzyskanych dla pary bazowej PK1 była para PK2, w której zredukowano masę jedynie poprzez zastosowanie wybrań w postaci otworów walcowych. Wśród rozwiązań alternatywnych, zbliżoną do uzyskanej dla pary bazowej PK1 wartość maksymalnego momentu uzyskano dla par kół PA3 i PA5. W kołach tych stwierdzono jednak większą wartość kąta skrzywienia w chwili ich uszkodzenia.

Ostatni etap badań doświadczalnych, którym poddano opracowane rozwiązania konstrukcyjne współpracujących par kół zębatach, dotyczył wyznaczenia ich trwałości zmęczeniowej. Badania te przeprowadzono na stanowisku pracującym w układzie otwartym o nominalnym momencie obrotowym 22 N·m i zakresie zmian prędkości obrotowej zębniaka 200-955 obr./min. dokonując automatycznej rejestracji wartości momentu i prędkości obrotowej w czasie rzeczywistym. W trakcie badań zmęczeniowych w strefie zazębienia prowadzono bezstykowe pomiary temperatury pary kół wykorzystując kamerę termowizyjną i pirometr, a za pomocą sonometru mierzono ciśnienie akustyczne. Przedział wyznaczonej trwałości zmęczeniowej kół zębatach podzielono na fazy: fazę pierwszą, podczas której prowadzono docieranie współpracującej pary kół, stanowiącą etap badań złożony z trzech cykli o zróżnicowanym czasie trwania, wartości momentu i prędkości obrotowej zębniaka oraz fazy kolejne, stanowiące zasadniczą część badań, z których każda złożona była z trzech powtarzających się cykli o ustalonym czasie trwania, wartości momentu i prędkości obrotowej. Badania trwałościowe prowadzono do chwili uszkodzenia jednego ze współpracujących kół. Wyniki badań trwałościowych par kół w postaci przebiegów zmian ciśnienia akustycznego i temperatury w strefie współpracy wieńców zębatach przedstawiono na przykładzie reprezentatywnych par dla danej serii badań. Dodatkowo na fotografiach zwizualizowano postaci zużycia obserwowanego na powierzchniach bocznych zębów w formie zużycia dogładzającego, złuszczenia na powierzchni roboczej lub pęknięć.

Rozdział dziesiąty zamyka opis opracowanych wyników wytrzymałościowych badań stanowiskowych statycznych i trwałościowych oraz ich analiza, przeprowadzona w odniesieniu do pary kół bez modyfikacji PK1. Syntetyczne zestawienie tych wyników oraz kosztów wytworzenia poszczególnych wariantów zmodyfikowanych konstrukcji par kół zębatach przedstawiono w formie tabelarycznej (tabela 10.7) i wykresu słupkowego zamieszczonego na

rys. 10.66. Na tej podstawie Doktorantka stwierdza, że parą kół, która może stanowić alternatywę dla rozwiązania klasycznego, zapewniającą największą redukcję kosztów wytwarzania (o ponad 40%) i największą redukcję zużycia materiału (o ponad 47%], przy jednoczesnym zwiększeniu trwałości względem kół bez modyfikacji, jest para kół oznaczona jako PA6. Zastosowanie konstrukcji ażurowej z licznymi otworami w kształcie plastra miodu wraz z cienkimi ścianami, zwiększyło trwałość tej pary kół względem pary odniesienia o 100%. Tym samym dowiedziono tezę pracy, iż możliwe jest obniżenie masy kół zębatych wykonanych z tworzyw polimerowych z zastosowaniem procesów przyrostowych poprzez odpowiednią modyfikację konstrukcji tarcz kół przy jednoczesnym zachowaniu trwałości przekładni.

Opisane w pracy z należytą starannością wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych zapewniły możliwość obszernego wnioskowania, które Doktorantka przedstawiła w rozdziale jedenastym. Podział sformułowanych wniosków na wnioski poznawcze i użyteczne podkreśla zarówno aktualność podjętej tematyki badawczej, nowatorski aspekt badań, jak i praktyczny wymiar ich wyników. Na podkreślenie zasługuje fakt, że rozprawę zamyka zbiór wniosków dotyczących dalszych badań, w których Doktorantka nakreśla ścieżkę kontynuacji swojej działalności naukowo-badawczej.

### **3. Ocena rozprawy**

Intensywny rozwój technik przyrostowego wytwarzania skutkuje coraz szerszym ich zastosowaniem w różnorodnych gałęziach przemysłu. Efektywność wytwarzania z wykorzystaniem maszyn realizujących przyrostowe wytwarzanie oraz coraz lepsze właściwości użytkowe uzyskanych tą drogą wyrobów zaczęły być konkurencyjne w porównaniu do tradycyjnych metod obróbek ubytkowych i bezubytkowych. Uzasadnia to coraz większe zainteresowanie różnych ośrodków naukowo-badawczych podejmowaniem prac badawczo-rozwojowych służących aplikacji tej technologii do wytwarzania spełniających oczekiwania konstruktorów elementów maszyn. W ten nurt prac wkomponowuje się recenzowana rozprawa doktorska. Należy stwierdzić, że prezentowany w niej opis zrealizowanych badań teoretycznych i doświadczalnych pod względem merytorycznym zasługuje na bardzo dobrą ocenę i nie budzi istotnych zastrzeżeń. Nieliczne uwagi dotyczące obszaru merytorycznego rozprawy wynikają przede wszystkim z woli uściślenia niektórych zagadnień, mogących stanowić przyczynek do dyskusji podczas obrony recenzowanej rozprawy i dotyczących następujących problemów:

- 1) Dobór materiału z którego wytworzono koła zębate poprzedzono badaniami normatywnych próbek wykonanych z użyciem techniki FFF z sześciu materiałów



polimerowych: ABS, PLA, HABS, PC/ABS, UniHIPS i S&S. Czym kierowano się przeprowadzając, oprócz osiowego rozciągania, badania wytrzymałościowe w warunkach statycznego skręcania?

- 2) Do wytworzenia próbek poddanych badaniom wytrzymałościowym w warunkach osiowego rozciągania i statycznego skręcania zastosowano strukturę typu kratka z różnymi gęstościami wypełnień (13%, 15%, 20%, 65%, 80% i całkowicie wypełnioną), wynikającymi z zastosowanego urządzenia prototypującego UP BOX+ o zamkniętej budowie, zapewniającej utrzymanie optymalnej temperatury wydruku. Ustalone na podstawie badań wytrzymałościowych próbek wytworzonych w tych warunkach parametry wydruku wykorzystano podczas przyrostowego wytwarzania kół zębatych na urządzeniu Prusa i3 MK3, w którym zastosowano samodzielnie skonstruowaną komorę termoizolacyjną. Z jaką pewnością można stwierdzić, że materiał wytworzony w tych warunkach zachował właściwości wyznaczone na próbkach modelowych?
- 3) Opracowanie statystyczne wyników badań doświadczalnych zarówno statycznych, jak i zmęczeniowych, ograniczono do określenia wartości średnich wyznaczanych wielkości. Z pewnością wskazanym byłoby wyliczenie przynajmniej wartości odchylenia standardowego, co wpłynęłoby pozytywnie na jednoznaczną ocenę uzyskanych wyników badań i uściślenie treści sformułowanych wniosków,
- 4) Jak należy rozumieć wprowadzenie w opisie warunków statycznych badań wytrzymałościowych par kół zębatych, prędkości obrotowej wykonywanej próby wynoszącej 0,5 obr./min?

Pewne uwagi mogą również budzić nieliczne kwestie o mniejszym znaczeniu, natury edytorskiej, a dotyczące na przykład:

- ujmowania oznaczeń jednostek w nawias kwadratowy, np.: „1 [mm]” i „20 [°]” (str. 23<sup>7</sup>), „2,5 [mm]” (str. 56<sup>15</sup>), „13 [%], 15 [%], 20 [%], 65 [%], 80 [%]” (str. 57<sup>9</sup>), „0,5 [obr./min]” (str. 120<sup>3</sup>) i wiele innych,
- zastosowania stylu potocznego, np. „... wartości momentu i obrotów ...” (str. 132<sup>7</sup>) zamiast „...wartości momentu i prędkości obrotowej ...”
- stosowania zapisu „*naprężenie von Mises*” (str. 57<sup>13</sup>, 97<sup>3</sup>, 97<sup>2</sup>, 101<sup>1,5,6</sup> i wiele innych) jako syntetycznej formy wyrażającej w praktyce wartość naprężenia zredukowanego wyznaczoną przy użyciu hipotezy wyężeniowej HMM,
- nieprecyzyjnego zapisu wyników badań, np. „... (*spadek kosztów wytworzenia o ponad 40 [%]*).” (str. 118<sup>11-12</sup>).

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy interpunkcyjne, które przekazano bezpośrednio Doktorantce do wykorzystania podczas przygotowywania publikacji.

Przytoczone uwagi nie wpływają na ogólnie bardzo wysoką ocenę poziomu recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Doktorantka wykazała się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych oraz bardzo dużą wiedzą w zakresie nowoczesnych technologii wytwarzania, a do jej oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) Ustalenie materiału prototypowego zastosowanego do wytworzenia poddanych badaniom par kół zębatach na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych w warunkach osiowego rozciągania i skręcania grupy 6 materiałów: ABS, PLA, HABS, PC/ABS, UniHIPS i S&S o strukturze wewnętrznej typu kratka i zróżnicowanej gęstości tejże struktury. Należy podkreślić, że producenci rozpatrywanych filamentów, w odniesieniu do wyrobów o różnych gęstościach wypełnień, niezwykle oszczędnie dzielą się takimi danymi.
- 2) Oszacowanie kosztów wytwarzania przyrostowego z użyciem techniki FFF każdego z jedenastu rozpatrywanych w pracy wariantów konstrukcji współpracujących kół zębatach wykonanych z materiału polimerowego ABS, w tym dziesięciu wariantów o zmodyfikowanej geometrii tarczy. Na podstawie uzyskanych wyników badań wyliczono masę i cenę zużytego filamentu oraz czas druku, jako główne czynniki wpływające na całkowity koszt wytworzenia pojedynczej pary współpracujących kół zębatach.
- 3) Doświadczalną weryfikację wyników uzyskanych podczas analizy MES, dotyczących lokalizacji maksymalnych naprężeń zredukowanych w obrębie wieńca zębatach kół w warunkach obciążenia statycznego momentem skręcającym, na podstawie lokalizacji uszkodzeń w obiektach rzeczywistych podczas prób stanowiskowych.
- 4) Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej każdego z jedenastu rozpatrywanych w pracy wariantów konstrukcji współpracujących kół zębatach, w tym dziesięciu wariantów o zmodyfikowanej geometrii tarczy, z uwzględnieniem zmian wartości ciśnienia akustycznego i temperatury w strefie współpracy wieńców zębatach.
- 5) Wytypowanie współpracującej pary kół zębatach o konstrukcji alternatywnej, wykazującej dwukrotny wzrost trwałości zmęczeniowej w odniesieniu do trwałości kół bez modyfikacji, co dowodzi prawidłowo przeprowadzonego procesu konstrukcyjnego w kontekście wykorzystania wytworzonych kół, jako elementy mechanizmów pracujące w warunkach występowania obciążeń zmiennych.

- 6) Identyfikację charakteru zużycia powierzchni bocznej zębów i uszkodzeń podczas badanych trwałościowych kół zębatych w postaci: łuszczenia, odprysków, pittingu, zużycia dogładzającego oraz pęknięć zmęczeniowych w pobliżu walca podziałowego.
- 7) Dowiedzenie tezy pracy w świetle wyników przeprowadzonych badań i analiz, dających bezsprzeczne podstawy do stwierdzenia, że możliwe jest obniżenie masy kół zębatych wykonanych z tworzyw polimerowych z zastosowaniem procesów przyrostowych poprzez odpowiednią modyfikację konstrukcji tarcz kół przy jednoczesnym zachowaniu trwałości przekładni.

#### 4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej wyżej oceny rozprawy Pani mgr inż. Małgorzaty Gontarz-Kulisiewicz wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- Doktorantka posiada umiejętność zaprojektowania złożonych zadań naukowych i zagadnień praktycznych oraz ich realizacji nowoczesnymi metodami,
- podjęte w rozprawie trudne zadania zostały zrealizowane na wysokim poziomie,
- przeprowadzone analizy skomplikowanych zjawisk, opracowanie wyników i forma wniosków nie budzą zastrzeżeń,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktorantki w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na jej dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że praca Pani mgr inż. Małgorzaty Gontarz-Kulisiewicz pt.: *„Wpływ konstrukcji polimerowych kół zębatych o zredukowanej masie na trwałość przekładni wytwarzanych metodą FFF”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązującej ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1551). Jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Autorki do jej publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych badań, poziom naukowy oraz potencjał aplikacyjny rozprawy doktorskiej wnioskuję o jej wyróżnienie.

