

**Dr hab. inż. Grzegorz WOJNAR, prof. PŚ**

Katowice, 3.02.2025 r.

Katedra Transportu Drogowego

Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej

Politechnika Śląska

### **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Gontarz-Kulisiewicz pt. „Wpływ konstrukcji polimerowych kół zębatach o zredukowanej masie na trwałość przekładni wytwarzanych metodą FFF” opracowana na podstawie uchwały z dnia 27.11.2024 r. Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.**

#### **1. Przedstawienie informacji o ocenianej rozprawie doktorskiej wg wytycznych zawartych w umowie dotyczącej sporządzenia niniejszej recenzji**

##### **1.1. Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora**

Przekładnie zębate są powszechnie stosowane w układach przeniesienia napędu i jednym z istotnych kierunków ich badań jest redukcja masy, w tym masy oraz momentu bezwładności kół zębatach. Z tego powodu prowadzi się badania zorientowane na korektę kształtu kół zębatach jak i zastosowanie materiałów o gęstości mniejszej niż stal. Innym istotnym kierunkiem badań kół zębatach jest zmniejszanie drgań przenoszonych ze strefy zazębienia na wały przekładni, poprzez zastosowanie materiału charakteryzującego się większą wartością współczynnika tłumienia drgań niż stal. **Z powyższych powodów podjęta w rozprawie doktorskiej tematykę uważam za aktualną oraz ważną ze względów naukowych, poznawczych, a także użytkowych. Tytuł rozprawy uznaję za właściwy.**

*Wojnar*

## 1.2. Ocena układu rozprawy doktorskiej w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

**Układ rozprawy uznaję za jak najbardziej poprawny.** Rozdział pierwszy stanowi analizę bardzo aktualnej literatury dotyczącej badanego zagadnienia. Na tej podstawie Autorka w sposób właściwy uzasadnia potrzebę podjęcia tematyki przedstawionej w niniejszej rozprawie oraz w rozdziale drugim formułuje cel pracy, przemyślaną tezę, a także obszerny zakres pracy wymagający przygotowania bardzo wielu próbek do badań materiałów na koła zębate oraz samych kół zębatach. Rozdział trzeci jest poświęcony konstrukcji przekładni i kół zębatach, w tym rozwiązaniom tarcz kół łączących wieniec zębata z piastą. Wnioski z tego rozdziału posłużą do zaproponowania w rozdziale siódmym własnych oryginalnych rozwiązań kół zębatach. W rozdziale czwartym Doktorantka przedstawia metody wytwarzania kół zębatach, w tym przyrostowe (podrozdział 4.3) oraz stosowane materiały. Rozdział piąty poświęcony jest modelowaniu kół zębatach w celu uzyskania poprawnego kształtu wieńca zębatego. W rozdziale szóstym został przedstawiony obszerny plan badawczy. W rozdziale siódmym przedstawiono opracowane kształty kół zębatach, które następnie będą poddawane dalszej analizie. Wśród nich znalazły się zarówno klasyczne kształty jak i kształty trudne do wykonania bez zastosowania metod wytwarzania przyrostowego. W rozdziale ósmym Autorka przedstawia wyniki własnych badań próbek wykonanych z materiałów planowanych do użycia na koła zębata i na tej podstawie wybiera materiał do dalszych badań. W rozdziale dziewiątym przedstawione zostały wyniki analizy MES (metoda elementów skończonych), kół zębatach zaproponowanych w rozdziale siódmym. Na tej podstawie wyznaczono między innymi przemieszczenia całkowite spowodowane obciążeniem zęba zębownika siłą międzyzębną. Najciekawszym rozdziałem, niewątpliwie jest rozdział dziesiąty, w którym przedstawiono wyniki badań stanowiskowych, ukierunkowane na badania statyczne kół zębatach oraz na badania trwałościowe. Badania te prowadzono na różnych stanowiskach badawczych. W rozdziale jedenastym przedstawiono obszerne wnioski płynące z przeprowadzonych badań i co cenne podzielono je na: wnioski poznawcze, utylitarne oraz dotyczące dalszych badań. Tezę pracy uznaję za udowodnioną. Na końcu pracy zamieszczono wykaz literatury, a także streszczenia w języku polskim i angielskim.



### 1.3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Wykaz literatury liczy 155 starannie wybranych pozycji dotyczących tematu rozprawy, a na szczególną uwagę, po pierwsze, zasługuje to, że zdecydowana większość pozycji literaturowych została opublikowana w języku angielskim, a po drugie:

- aż 59 pozycji przywołanych przez Autorkę rozprawy (38%) zostało opublikowanych w roku 2021 lub później (ostatnie 3 pełne lata przed złożeniem rozprawy),
- aż 90 pozycji przywołanych przez Autorkę rozprawy (58%) zostało opublikowanych w roku 2019 lub później (ostatnie 5 pełnych lat przed złożeniem rozprawy),
- aż 116 pozycji przywołanych przez Autorkę rozprawy (75%) zostało opublikowanych w roku 2014 lub później (ostatnie 10 pełnych lat przed złożeniem rozprawy).

Niewątpliwie świadczy to o aktualności przeglądu literatury i **należy to odnotować jako zaletę rozprawy. Cytowane pozycje są dobrane poprawnie, a wiele z nich jest publikowanych w uznanych czasopismach zarejestrowanych w międzynarodowych bazach.**

### 1.4. Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydatki

„Celem pracy było wykonanie porównawczych badań trwałości, z uwzględnieniem temperatury i ciśnienia akustycznego, współpracujących par kół zębatych o zmodyfikowanej konstrukcji tarczy, wytworzonych z materiału polimerowego z zastosowaniem technologii przyrostowej FFF (ang. Fused Filament Fabrication - wytwarzanie poprzez wytłaczanie filamentu)”. **Przywołany cel oceniam bardzo wysoko, gdyż modyfikacja konstrukcji tarczy kół może się przyczynić m.in. do:**

- **zmniejszenia masy i momentu bezładności kół zębatych, a zastosowanie technologii przyrostowych powoduje powstanie nowych możliwości w zakresie uzyskiwanych kształtów,**
- **poprawy odprowadzenia ciepła ze strefy zazębienia, co w przypadku kół wykonywanych z tworzyw sztucznych jest bardzo ważne i zostało przedstawione również w niniejszej pracy.**

Jedynie poprzedził bym zacytowany cel słowem „Głównym ...” gdyż, autorka uzyskała wiele cennych wyników przedstawionych w rozdziałach siódmym, ósmym, dziewiątym i podrozdziale 10.2.

### **1.5. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych**

Kandydatka poprawnie dobrała metody badawcze do analizowanych zjawisk:

- badania doświadczalne w celu określenia:
  - wartości maksymalnego naprężenia pochodzącego od rozciągania,
  - maksymalnego obciążenia,
  - przemieszczenia podczas rozciągania,
  - maksymalnego momentu skręcającego,
  - kąta skręcenia przy maksymalnym momencie skręcającym,
- kształtek o różnej gęstości wypełnienia struktury wewnętrznej wykonanych w technologii FFF (ang. Fused Filament Fabrication),
- metoda elementów skończonych w celu wyznaczenia naprężeń i odkształceń występujących w proponowanych do analiz kołach zębatych, często o oryginalnym kształcie,
- badania doświadczalne proponowanych kół zębatych w celu określenia maksymalnego momentu obciążenia i kąta skręcenia przy maksymalnym momencie obrotowym,
- badania doświadczalne w celu określenia czasu pracy proponowanych kół zębatych.

**Przedstawiona procedura badawcza nie budzi zastrzeżeń recenzenta i w jego ocenie jest jak najbardziej poprawna. Natomiast jeżeli chodzi o wykorzystane urządzenia badawcze to można stwierdzić, że zastosowano nowoczesną aparaturę w tym:**

- maszynę wytrzymałościową INSTRON 3367,
- stanowisko do badania statycznego pary kół zębatych,
- stanowisko do badań trwałościowych pary kół zębatych,
- urządzenie drukujące Prusa i3 Mk3 wyposażone w komorę termoizolacyjną,
- urządzenie UP BOX+ i dedykowane do niego oprogramowanie (UP Studio),
- kamerę firmy FLIR typ C5,



- sonometr CEM DT-95.

Dobór użytej aparatury również uważam za właściwy.

### **1.6. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań**

Autorka bardzo dobrze omawia wyniki badań uzyskane w rozdziałach ósmym, dziewiątym i dziesiątym ale zanim do tego przystępuje każdorazowo zestawia je w tabelach, których układ jest dobrze przemyślany, oraz na wykresach. To znacząco zmniejsza możliwość wystąpienia błędów. Przykładowo bardzo interesujących spostrzeżeń dokonała Doktorantka w podrozdziale 8.5 gdzie na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych zauważyła, że w przypadku próbek o gęstości wypełnienia struktury wewnętrznej typu „kratka” od 13% do 65%, w obrębie jednego materiału badane próbki charakteryzowały się zbliżonymi wartościami maksymalnego naprężenia pochodzącego od rozciągania, maksymalnego obciążenia, maksymalnego momentu skręcającego oraz kąta skręcenia przy maksymalnym momencie skręcającym. Na tej podstawie zauważono, iż ze względów ekonomicznych uzasadnione jest wykonywanie modeli o najniższej gęstości wypełnienia struktury wewnętrznej. Omówienie wyników w innych przypadkach również nie budzi uwag recenzenta, gdyż na wysokim poziomie.

### **1.7. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań**

W przypadku metod wytwarzania przyrostowych, każdy rok wiąże się z istotnym postępem, a mimo to wyniki uzyskane przez Autorkę należy uznać za bardzo ważne ze względów praktycznych i aplikacyjnych dlatego że:

- na podstawie badań wytrzymałości na rozciąganie oraz skręcanie, próbek z materiałów ABS, PLA, PC/ABS, HABS i S&S wynika iż w przypadku struktury wewnętrznej typu kratka o gęstości 13 [%] uzyskuje się parametry wytrzymałościowe zbliżone do tych, którymi cechują się próbki wykonane odpowiednio z tego samego materiału o wyższej gęstości nawet 65%. Wniosek ten pozwala na oszczędność materiału i energii. Ponadto cenne jest to, że w przypadku zastosowania ABS i metod przyrostowych FFF maksymalne naprężenia ze względu na rozciąganie próbek pełnych wynoszą zaledwie ok. 2/3 (rys. 8.14) wartości podawanych przez producenta (tab. 8.1) dla materiału litego.

W obliczu takich różnic wskazanie konieczności prowadzenia badań wytrzymałościowych próbek wykonywanych metodami przyrostowymi jest cenne;

- na podstawie wykonanych zdjęć termowizyjnych współpracujących par kół zębatych polimerowych podczas badania trwałości stwierdzono, że w kołach o ażurowej konstrukcji tarczy (pary PA2 - PA6) nie występują koncentracje ciepła, tak jak to było dostrzegalne w pozostałych rozpatrywanych parach, a skuteczne odprowadzenie ciepła ze strefy zazębienia jest szczególnie istotne w przypadku kół zębatych wykonanych z ABS;
- uwzględnienie w ażurowej tarczy wybrań w postaci graniastosłupów o podstawie sześciokąta foremnego (PA6), w największym stopniu spośród analizowanych konstrukcji kół o zredukowanej masie, spowodowało zwiększenie, względem par PK1, trwałości w aspekcie liczby faz badania aż do momentu wystąpienia uszkodzeń. Spostrzeżenie to pozwala w stosunku do klasycznych pełnych kół (PK1) na zmniejszenie: ich masy i momentu bezwładności oraz zużycia materiału i kosztu wytworzenia.

**Praktyczny wymiar uzyskanych wyników badań oceniam bardzo wysoko.**

#### **1.8. Informacja o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie:**

- Praca jest napisana poprawnym językiem technicznym i jedynie proponowałbym Autorce:
  - o niestosowanie słowa „spadek” (str. 17, 77, 104, 118, 121, 146, 148, 155, 158, 160, 164), a w zamian stosowanie słowa „zmniejszenie”;
  - o niestosowanie zwrotu „w oparciu o ...” (np. str. 57), a w zamian stosowanie np. zwrotu „na podstawie ...”.
- Typowe błędy literowe, stylistyczne, a także interpunkcyjne występują bardzo rzadko, co świadczy o dokładności Doktorantki i dbałości o szczegóły i aby to jeszcze czytelniej przedstawić poniżej zawarto wszystkie dostrzeżone błędy literowe, których zdaniem recenzenta w rozprawie liczącej 185 stron formatu A4 jest wyjątkowo mało: str. 11 i 35 „głównie” zamiast „głównie”, str. 13 „znacznym” zamiast „znaczonym”, str. 16 „ogromny” zamiast „ogromy”, str. 23

*Aden*

„definiującymi” zamiast „definiujących”, str. 24 „obtacza” zamiast „odtacza”, str. 41 „procesem” zamiast „proces”, str. 42 brak słowa „na” po słowach „Ze względu”, str. 54 brak słowa „z” po słowie „związanych”, str. 72 „wydłużenia” zamiast „wydłużeniu”, str. 127 „omawianą” zamiast „omawiają”, str. 155 lepiej byłoby usunąć słowo „że” za słowem „PA6”, str. 156 w kontekście szyku zdania lepiej słowo „przyczynia” zastąpić słowem „oddziałuje”, gdyż lepiej wiąże się ono z później zastosowanym słowem „na”, str. 159 „zwiększenia” zamiast „zwiększenie”, str. 160 „uwzględniającą” zamiast „uwzględnijająca”, str. 167 „trwałości” zamiast „trwałość”.

- Na rysunkach od 9.6 do 9.13 podano wartości naprężeń przy opisie zastosowanych na rysunku kolorów i w wersji papierowej rozprawy są one nieczytelne. Na obronę Autorki przemawia to, że w wersji elektronicznej pracy opisy te są już czytelne, a wszystkie pozostałe rysunki i tabele charakteryzują się wysokim poziomem graficznym.
- W pracy zapisano „Otwory z wielowypustem w piastach projektowanych kół wykonano zgodnie z normą PN ISO 14:1994 [113]. Przyjęto również, że szerokość piasty dla zębniaka i koła zębatego jest taka sama jak ich wieńców.”, natomiast recenzent nie zauważył, aby podane zostały wymiary wielowypustu. Należy jednak przyznać, że na bardzo wielu rysunkach można zauważyć, że zastosowano wielowypust równoległy, o liczbie wypustów równej 6, a wymiary można wywnioskować z proporcji zawartych na przedstawionych w pracy rysunkach.
- Zdecydowanie nie zgodzę się ze zdaniem zapisanym na str. 24 „Ewolwentę tworzy linia prosta, która odtacza się względem koła zasadniczego (parametr  $d_w$  na rys. 3.5) o zadanym jego promieniu ( $r_b$ ).” gdyż stanowi ono nieuprawniony skrót myślowy i zdanie to np. za pozycją L. Müllera „Przekładnie zębate projektowanie” powinno brzmieć „W geometrii ewolwentą nazywa się każdą krzywą zakreślaną przez punkt leżący na prostej toczącej się bez poślizgu po dowolnej krzywej zwanej ewolutą”. W przypadku kół zębatych jest nią koło o promieniu zasadniczym, chyba że analizujemy nieokrągłe koła zębate wtedy ewolutą jest inna krzywa. Napisałem, że jest to nieuprawniony skrót myślowy ponieważ na podstawie zapisów zawartych na str. 44 dostrzegam, że Autorka rozumie proces tworzenia ewolwenty.

- Na stronie 112 w legendzie rysunku 9.14 zamiast „Wartość procentowa objętości względem zębniaka ZK1” należało zapisać „zmiana objętości analizowanego zębniaka względem zębniaka ZK1 wyrażona w procentach” dlatego, że np. zmiana objętości zębniaka ZK2 względem zębniaka ZK1 wyrażona w procentach wynosi 8,13%, a nie wartość procentowa objętości zębniaka ZK2 względem zębniaka ZK1 wynosi 8,13%. Proponowałbym dokładne przeanalizowanie w przyszłości precyzji pozostałych legend zawartych co najmniej na tym wykresie.

**Wszystkie zapisane w tym podpunkcie nieprawidłowości nie zmniejszają wartości naukowej, poznawczej i użytecznej recenzowanej rozprawy doktorskiej.**

### **1.9. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**

Zdaniem recenzenta opiniowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, gdyż Autorka w szczególności:

- przeprowadziła badania wytrzymałości na rozciąganie oraz skręcanie, próbek wytworzonych metodą przyrostową FFF z materiałów: ABS, PLA, PC/ABS, HABS i S&S o różnej gęstości struktury oraz na ich podstawie przedstawiła istotne wnioski;
- przeprowadziła badania statyczne kół zębatach o oryginalnej konstrukcji, które były wykonane metodą FFF z ABS i na podstawie których wyznaczyła wartość maksymalnego momentu niszczącego koła oraz odpowiadającego mu kąta obrotu koła;
- przeprowadziła badania trwałości kół zębatach o oryginalnej konstrukcji, które były wykonane metodą FFF z ABS i na tej podstawie dowiodła, że koła o ażurowej tarczy z wybraniem w postaci graniastosłupów o podstawie sześciokąta foremnej (PA6), cechują się większą trwałością niż klasyczne pełne koła zębata.

### **1.10. Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatka w dyscyplinie albo w dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej**



Bez wątplenia Autorka pracy wykazuje się bardzo dużą wiedzą teoretyczną w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna i było to widoczne we wszystkich rozdziałach pracy, a w szczególności w rozdziałach od piątego do jedenastego, oraz w ich podsumowaniach.

## 2. Uwagi polemiczne i zapytania

**Jak wynika z treści recenzji opiniowaną pracę oceniam bardzo wysoko.** W naturalny sposób lektura każdej rozprawy skłania do pewnych uwag polemicznych i pytań:

- 2.1. Na podstawie obserwacji rysunku 8.11 można zauważyć, że wartości maksymalnych naprężeń dla pięciu badanych próbek są praktycznie takie same, natomiast na podstawie obserwacji rysunku 8.10 wartości maksymalnych naprężeń dla pięciu badanych próbek różnią się o nieco ponad 2 MPa. Bardzo proszę o sprawdzenie i wyjaśnienie czy na rysunku 8.14 nie popełniono przypadkiem omyłki w oznaczeniach wartości błędów dla wartości maksymalnych naprężeń w przypadku wyników prezentowanych dla gęstości wypełnienia 13% i materiałów Ha13 (HABS) oraz CA13(PC/ABS), gdyż wartości zaznaczonych błędów są zbliżone.
- 2.2. Na stronie 114 zapisano „Każdą opracowaną współpracującą parę kół zębatych wykonano w ilości 10 par (zębnik + koło zębate) - 5 par do badania statycznego i 5 par do badania trwałości.” Z ciekawości poznawczej bardzo prosiłbym o przedstawienie wartości minimalnej, średniej i maksymalnej czasu pracy badanych par kół PK1 i PA6.
- 2.3. Bardzo prosiłbym, aby Autorka rozprawy w kontekście prowadzonych badań i analiz zwięźle wypowiedziała się w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej w jaki sposób dokładność wykonania kół zębatych (zwłaszcza odchyłki wykonania zębów kół zębatych) oraz chropowatość powierzchni roboczych zębów kół wpływają na pracę przekładni zębatych.

**Niniejsze pytania nie są próbą podważenia wysokiej wartości naukowej i poznawczej uzyskanych wyników badań, a jedynie wynikają z ciekawości badawczej recenzenta.**

## 3. Wnioski końcowe

**Stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mieszcząca się w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i dlatego wnioskuję do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki**

**Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o przyjęcie recenzowanej pracy oraz o dopuszczenie Pani mgr inż. Małgorzaty GONTARZ-KULISIEWICZ do jej publicznej obrony.**

Niniejsza rozprawa oprócz uzyskanych osiągnięć naukowych i poznawczych ma bardzo praktyczne wyniki przedstawione podrozdziale 1.7 niniejszej recenzji. Przegląd literatury został opracowany na podstawie bardzo aktualnych publikacji co wykazano w podrozdziale 1.3, w pracy przedstawiono wyniki obszernych badań w szczególności doświadczalnych, a całe opracowanie jest na wysokim poziomie merytorycznym.

**Z powyższych powodów w przypadku pozytywnego przebiegu obrony rozprawy doktorskiej oraz udzielenia przez Kandydatkę do stopnia doktora poprawnych odpowiedzi na pytania zadane w trakcie dyskusji zwracam się do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z prośbą dotyczącą rozważenia możliwości wyróżnienia rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Małgorzaty GONTARZ-KULISIEWICZ.**

*Gregorz Wójcik*