

Recenzja nr 06/dr/SJW

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Pawła Łuszczka pt. *Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatach ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM*

Podstawa opracowania recenzji: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej prof. dr. hab. inż. Jerzego Małachowskiego z dnia 30.07.2024 r. oraz stosowna umowa o dzieło.

1. Tematyka rozprawy

W ujęciu ogólnym, tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy zagadnienia oceny trwałości zmęczeniowej stykowej i identyfikacji przebiegu zużywania powierzchni bocznych zębów kół zębatach walcowych ze stali stopowej 21NiCrMo2, wytwarzanych techniką selektywnego stapiania laserowego SLM. Wartym podkreślenia jest fakt, iż na przełomie kilkunastu ostatnich lat problematyka wytwarzania przyrostowego przy zastosowaniu druku 3D stała się przedmiotem licznych badań i publikacji, a na dodatek stanowi jeden z wyznaczników Czwartej Rewolucji Przemysłowej. Duży stopień uniwersalności techniki SLM w odniesieniu do wytwarzania przyrostowego zróżnicowanych geometrycznie części z metali, definiuje możliwość jej szerokiej aplikacji w produkcji między innymi kół zębatach. Świadczy to o istotnym novum i znaczeniu praktycznym podjętego przez Pana mgr. inż. Jakuba Łuszczka tematu. Ponadto, bardzo niewiele badań dotyczących wytwarzania przyrostowego części maszyn z metali dotyczy produkcji kół zębatach ze stali stopowej 21NiCrMo2. W związku z tym, podjęta przez Pana mgr. inż. Jakuba Łuszczka tematyka rozprawy doktorskiej wypełnia lukę w obszarze druku 3D, skupiając się na opracowaniu oryginalnej metodyki wytwarzania przyrostowego SLM kół zębatach walcowych o ewolwentowym zarysie zębów, a także przeprowadzeniu kompleksowych badań wytrzymałości zmęczeniowej stykowej i identyfikacji mechanizmów powstawania uszkodzeń kół zębatach.

Podsumowując, podjętą tematykę rozprawy uważam za nowatorską i bardzo ważną w aspekcie kognitywnym oraz pragmatycznym, a w ten sposób oceniam jak najbardziej pozytywnie.

2. Ogólna ocena treści, układu i zakresu rozprawy

Rozprawa liczy 247 stron i składa się z 11 zasadniczych rozdziałów oraz streszczeń w języku polskim i angielskim, a także spisu literatury obejmującego 208 pozycji (oraz 12 norm).

We wstępie, Autor rozprawy w sposób syntetyczny charakteryzuje udział poszczególnych rodzajów części wytwarzanych przy użyciu technologii przyrostowych oraz ukazuje luki badawcze w obszarze dotyczącym tematyki rozprawy.

W rozdziale pierwszym rozprawy, Autor omawia zastosowanie technik przyrostowych w przemyśle, przedstawiając również istotę wytwarzania przyrostowego, a także wytwarzanie przyrostowe struktur metalowych oraz mechanizmy spajania materiałów w łożu proskowym.

Rozdział drugi rozprawy dotyczy rozwoju technik wytwarzania kół zębatach. Treść niniejszego rozdziału obejmuje omówienie technik kształtowania ubytkowego oraz przyrostowego kół zębatach. W podrozdziale dotyczącym technik kształtowania ubytkowego (2.1) Autor scharakteryzował również techniki wykorzystujące obróbkę plastyczną do formowania kół zębatach. W mojej jednak opinii metody wykorzystujące obróbkę plastyczną należą do technik wytwarzania bezubytkowego. W rozdziale drugim rozprawy, Autor poświęcił przede wszystkim dużą uwagę przedstawieniu aktualnego stanu zagadnienia dotyczącego wytwarzania przyrostowego kół zębatach z zastosowaniem tworzyw sztucznych oraz proszków metali – co z punktu widzenia tematyki rozprawy jest w pełni uzasadnione.

W trzecim rozdziale dysertacji Autor zaprezentował przegląd literatury dotyczący wytrzymałości zmęczeniowej kół zębatach. W podrozdziale 3.1 omówił klasyfikację badań przekładni zębatach, zaprezentował metody analityczne (na podstawie wzorów) dotyczące wyznaczania naprężeń podczas współpracy zębów, a także zaprezentował metodę badań doświadczalnych stykowej wytrzymałości zmęczeniowej kół zębatach. W podrozdziale 3.2 Autor zaprezentował bardzo obszerny przegląd literatury dotyczący wytrzymałości zmęczeniowej kół zębatach wytworzonych konwencjonalnie. Wartość merytoryczną niniejszego podrozdziału oceniam bardzo wysoko ze względu na kompleksowe ujęcie tematu i jego rolę w odniesieniu do zaprezentowanych w dysertacji badań własnych. Niemniej, w mojej opinii celem zwiększenia czytelności i stopnia zrozumienia treści warto byłoby zobrazować omawiane mechanizmy zużycia stosownymi schematami/rysunkami.

W rozdziale 4 rozprawy, Autor przedstawił podsumowanie i wnioski wypływające z analizy stanu zagadnienia.

Podsumowując treść pierwszych czterech rozdziałów rozprawy mogę stwierdzić, iż Autor w sposób wyczerpujący przedstawił aktualny stan zagadnienia dotyczący metod wytwarzania kół zębatach, a także metodyki ich badań wytrzymałościowych. Zawartość merytoryczną tych rozdziałów oceniam bardzo pozytywnie. W ramach niniejszego przeglądu literatury, Autor przestudiował bardzo wiele aktualnych prac naukowych, opublikowanych głównie w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym i w kompleksowy sposób omówił metody przyrostowego wytwarzania kół zębatach oraz ich badań wytrzymałościowych. Dużym atutem jest również zaprezentowanie wartościowego podsumowania przeglądu literatury, ukazującego w czytelny sposób luki badawcze w danym obszarze. Zdefiniowanie luk badawczych jest kluczowe w kontekście sformułowania celu badań własnych, osiągnięcie którego umożliwi rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego.

W rozdziale 5, Autor sformułował cel naukowy, cel użyteczny oraz zakres pracy. Zdefiniowane przez Autora cele rozprawy są sformułowane jednoznacznie i merytorycznie oraz wskazują na szerokie spektrum badań własnych. Niemniej jednak, z treści zawartych w zakresie badań nie wynika, że prowadzone badania własne dotyczyć będą również kół zębatach wytworzonych metodami konwencjonalnymi?

Rozdział 6 obejmował program badań własnych opracowanych przez Autora. W ramach niniejszego rozdziału Autor zaprezentował plan badań, omówił przygotowanie materiału i próbek do badań, oraz zaprezentował zastosowane w badaniach stanowiska i metody badawcze. W niniejszym rozdziale Autor zawarł stosowne schematy blokowe prowadzonych szerokich badań własnych, a także fotografie zastosowanych stanowisk badawczych, których obecność ułatwia zrozumienie czytelnikowi sekwencji prowadzonych prac badawczych.

W ramach rozdziału 7 Autor rozprawy zaproponował oryginalną metodykę wytwarzania przyrostowego SLM stali 21NiCrMo2, biorąc pod uwagę kryterium minimalizacji porowatości wytworzonych próbek. W pierwszej części rozdziału (punkt 7.1) przeprowadził badania materiału wsadowego, obejmujące analizy morfologiczne proszku stali z zastosowaniem mikroskopu SEM i analizatora obrazu. W podrozdziale 7.2 Autor przedstawił oryginalną metodykę doboru parametrów wytwarzania, uwzględniając wielkość objętościowej gęstości energii naświetlania VED. W tym celu przeprowadził szerokie badania doświadczalne przyjmując za zmienne wielkości wejściowe procesu: moc lasera, prędkość naświetlania, odległość między wektorami naświetlania oraz grubość warstwy naświetlanej. W celu usprawnienia procesu doboru parametrów wejściowych skorzystał z analizy Design of Experiment (DOE) zaimplementowanej w oprogramowaniu Statistica. Wytworzone przyrostowo – w zakresie podanych powyżej parametrów wejściowych – próbki ze stali 21NiCrMo2 poddał szczegółowym analizom, obejmującym wyznaczenie średnich wartości porowatości, identyfikację rodzajów porowatości próbek, badania mikrostruktury, a także rozkładu twardości oraz ich wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności. Na podstawie badań, Autor ostatecznie wytypował 1 grupę parametrów wejściowych, które następnie posłużyły do badań zasadniczych, obejmujących wytwarzanie SLM kół zębatych walcowych. Treść niniejszego rozdziału oceniam bardzo wysoko. Warty podkreślenia jest fakt, iż stal stopowa 21NiCrMo2 jest relatywnie rzadko stosowana jako materiał w technice SLM. W związku z tym, uzyskanie próbek wytwarzanych przyrostowo o odpowiednich właściwościach eksploatacyjnych, w kontekście zastosowania na koła zębate, wymagało od Autora opracowania oryginalnej metodyki doboru parametrów wejściowych procesu. W tym aspekcie, na pochwałę zasługuje bardzo staranne zaplanowanie planu eksperymentu, przeprowadzenie czasochłonnych badań doświadczalnych, a w końcu analiza wytworzonych próbek, biorąc pod uwagę wiele wielkości wyjściowych (np. porowatość, struktura, właściwości wytrzymałościowe i plastyczne). Niemniej, celem zwiększenia czytelności zaprezentowanych treści i rozbudowanej metodyki tych badań, warto byłoby umieścić w treści tego rozdziału schemat przedstawiający całą sekwencję badań doboru efektywnych parametrów wytwarzania SLM.

W rozdziale 8 dysertacji, Autor zaprezentował badania własne wpływu obróbki cieplno-chemicznej na właściwości stali 21NiCrMo2 wytwarzanej techniką SLM. W pierwszej części rozdziału (punkt 8.1) omówił realizację procesu obróbki cieplno-chemicznej obejmującej nawęglanie, hartowanie i odpuszczanie niskie. W kolejnym podpunkcie (8.2) Autor przeprowadził analizę mikrostruktury po procesie obróbki cieplno-chemicznej. W następnej części rozdziału Autor dokonał analizy twardości, naprężeń własnych oraz przedstawił wyniki statycznej próby rozciągania próbek. Rozdział zakończono istotną konkluzją, iż bezpośrednie przeniesienie warunków obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej stali 21NiCrMo2 wytwarzanej

konwencjonalnie do próbek wytworzonych techniką SLM nie zapewnia uzyskania przez nie oczekiwanych właściwości użytkowych.

W rozdziale 9 rozprawy, Pan mgr inż. Jakub Łuszczek przedstawił oryginalny proces technologiczny wytwarzania kół zębatach z zastosowaniem techniki SLM. Rozdział ten rozpoczął od przedstawienia budowy modelu CAD koła zębatego na potrzeby procesu SLM. W celu wyznaczenia parametrów geometrycznych wytwarzanych kół zębatach, Autor zastosował obliczenia analityczne na podstawie znanych w stosownej literaturze zależności. W kolejnej części rozdziału Autor przeanalizował wpływ procesu obróbki wykończeniowej na strukturę geometryczną powierzchni i masę wytworzonych kół zębatach. Następnie Autor zaprezentował badania porowatości wytworzonych kół zębatach na bazie oceny mikroskopowej powierzchni koła. W podrozdziale tym Autor zawarł również interesujący – w aspekcie poznawczym – autorski schemat mechanizmu powstawania porów otwartych na powierzchniach bocznych zębów kół wytwarzanych techniką SLM. W kolejnej części rozdziału Autor przedstawił wyniki badań mikrostrukturalnych oraz twardości wytworzonych kół zębatach. Niewątpliwie, dużym walorem naukowym niniejszego rozdziału jest opracowanie przez Autora dedykowanego modelu CAD koła zębatego walcowego dedykowanego do wytwarzania SLM, a także szerokie badania technologicznej warstwy wierzchniej wykonanych kół.

Rozdział 10 stanowi w mojej opinii fundamentalną część dysertacji, gdyż skupia się na badaniach zmęczeniowej trwałości stykowej kół zębatach (wytwarzonych techniką SLM), stanowiących cel naukowy rozprawy. W rozdziale tym Autor zaprezentował metodykę badań zmęczeniowych, obejmującą opis sekwencji, parametrów badań, a także zastosowanych przyrządów pomiarowych. Następnie, Autor poddał analizie wyniki badań kół zębatach wytwarzanych konwencjonalnie (10.2) oraz kół zębatach wytwarzanych techniką SLM (10.3). Przedmiotowe badania skupiły się na wyznaczeniu zmian wartości ubytku masy kół zębatach, analizie procentowego udziału defektów na powierzchniach bocznych zębów, analizie mikroskopowej wykruszeń zmęczeniowych, a także wyznaczeniu średniej wartości udziału oraz głębokości wykruszeń. Treść niniejszego rozdziału oceniam bardzo wysoko w kontekście pozyskania nowej wiedzy naukowej dotyczącej mechanizmów zużywania współpracujących walcowych kół zębatach wytwarzanych techniką SLM. Na uwagę zasługuje zwłaszcza zaprezentowanie autorskich schematów wyjaśniających mechanizmy: wypłukiwania cząstek materiału z porów częściowo zatartych, powstawania wykruszeń w miejscu występowania porowatości podskórnej oraz powstawania wykruszeń w miejscu występowania porowatości podpowierzchniowej. Pozyskana w ten sposób nowa wiedza naukowa może przyczynić się do rozwoju technik wytwarzania przyrostowego metali oraz tribologii kół zębatach.

W rozdziale 11 pod tytułem *Podsumowanie i wnioski końcowe*, Autor przedstawił w syntetyczny sposób najważniejsze konkluzje z przeprowadzonych badań, a także sformułował wnioski poznawcze oraz kierunki dalszych badań teoretycznych i doświadczalnych. Dużym atutem niniejszego rozdziału jest również zaprezentowanie przez Autora oryginalnych osiągnięć wpływających z realizacji dysertacji.

Ogólna kompozycja rozprawy zasługuje na wysoką ocenę. Warto podkreślić, iż pomimo bardzo dużej objętości rozprawy (prawie 250 stron), zagadnienia w niej zaprezentowane są bardzo spójne i w pełni zbieżne z tematyką oraz celami pracy. Autor poprawnie przyjął kolejność rozdziałów i dokonał prawidłowego podziału treści na rozdziały i podrozdziały.

Praca zrealizowana jest również na wysokim poziomie językowym i edycyjnym, co wpływa pozytywnie na poczytność rozprawy i zrozumienie treści. W treści pracy można wyróżnić jedynie pewne drobne błędy językowe i literówki (mają one znaczenie drugorzędne i nie umniejszają znaczących walorów naukowych pracy), co z punktu widzenia bardzo dużej objętości pracy, świadczy o wysokim poziomie językowym Autora.

Podsumowując ogólną ocenę treści rozprawy chciałbym przedstawić jej najważniejsze zalety naukowe, wskazujące jednocześnie na osiągnięcia naukowe Autora:

- nowatorska i niszowa tematyka rozprawy w obszarze technik wytwarzania przyrostowego SLM kół zębatych ze stali stopowej 21NiCrMo2,
- opracowanie autorskiej i oryginalnej metodyki wytwarzania przyrostowego SLM stali 21NiCrMo2, biorąc pod uwagę kryterium minimalizacji porowatości wytworzonych próbek,
- autorska koncepcja procesu technologicznego wytwarzania kół zębatych walcowych ze stali 21NiCrMo2 o ewolwentowym zarysie zębów z zastosowaniem techniki SLM,
- kompleksowe badania zmęczeniowej trwałości stykowej kół zębatych, obejmujące między innymi wyznaczenie zmian wartości ubytku masy kół zębatych, analizę procentowego udziału defektów na powierzchniach bocznych zębów, analizę mikroskopową wykruszeń zmęczeniowych, a także wyznaczenie średniej wartości udziału oraz głębokości wykruszeń,
- dokonanie przez Autora identyfikacji mechanizmów: wypłukiwania cząstek materiału z porów częściowo zatartych, powstawania wykruszeń w miejscu występowania porowatości podskórnej oraz powstawania wykruszeń w miejscu występowania porowatości podpowierzchniowej.

3. Uwagi do rozprawy doktorskiej

W niniejszej części recenzji zaprezentuję pewne uwagi, a także fragmenty rozprawy wymagające dodatkowych komentarzy i wyjaśnień ze strony Autora. Chciałbym zaznaczyć, iż w większości przypadków uwagi te mają charakter dyskusyjny, a nie stanowią bezpośredniego stwierdzenia niedociągnięć lub błędów.

- **Uwaga do całej treści rozprawy:** zalecane jest stosowanie kursywy w odniesieniu do symboli zmiennych przedstawionych w pracy.
- **Rozdział 1.1, s. 13:** zwrot „*detali*” jest kolokwializmem. Zalecana jest modyfikacja zwrotu np. do formy „części”, lub „*obrobionych elementów*”. Takowa nieścisłość językowa powtarza się kilka razy w dysertacji.
- **Rozdział 1.2, s. 19:** zdanie: „*Właściwości mechaniczne elementów wytwarzanych z wywołaniem pełnego przetopu mogą być porównywalne, co do wartości, z elementami wytwarzanymi technikami konwencjonalnymi (...) obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej.*” jest bardzo złożone i zbyt długie. Zalecane byłoby podzielenie zdania na kilka krótszych, celem zwiększenia czytelności treści.
- **Rozdział 2, s. 22:** zalecana jest zmiana zwrotu „*obróbki wykańczającej*” na „*obróbki wykończeniowej*”.

- **Rozdział 2, s. 23:** zalecana jest poprawa błędu w nazwie „metoda Suderlanda” na „metoda Sunderlanda”.
- **Rozdział 2, s. 27:** zalecana jest poprawa błędu w nazwie „dłuta Fellowsa” na „dłutaka Fellowsa”.
- **Rozdział 2.2.1, s. 33:** zalecana jest modyfikacja zwrotu „geometrycznej struktury powierzchni” do formy „struktury geometrycznej powierzchni”.
- **Rozdział 2.2.2, s. 39:** Pojęcie „frezów trzpieniowych, w tym z pełnym promieniem zaokrąglenia” jest niezrozumiałe. Proszę o wyjaśnienie, co Autor rozumie pod pojęciem „z pełnym promieniem zaokrąglenia”? Czy promień może być „pełny”? Może chodzi o frezy kuliste, których promień naroża, równy jest promieniowi nominalnemu frezu?
- **Rozdział 3.1, s. 50 – 56:** w opisie dotyczącym równań 3.1 – 3.7 zabrakło przytoczenia źródła, z którego zostały zaczerpnięte.
- **Rozdział 3.2, s. 62:** zwrot „szczepienia/spawania” jest błędny i powinien zostać zastąpiony zwrotem „szczępienia/spawania”.
- **Rozdział 3.2, s. 65:** W treści rozprawy mowa jest o dwóch skrajnych punktach przyporu oznaczonych symbolami ξ_1 i ξ_2 . Niemniej, na rysunku 3.4, do którego odwołuje się Autor oznaczone są symbole ξ_A i ξ_B ? Czy są one tożsame?
- **Rozdział 3.2, s. 68:** zwrot „wysokości szczytów chropowatości Rz” jest błędny, Poprawna forma to „najwyższej wysokości profilu chropowatości Rz”.
- **Rozdział 3.2, s. 71:** zalecana jest modyfikacja kolokwializmu „katastroficznego wyłamania zęba” do formy „katastrofalnego wyłamania zęba”.
- **Rozdział 3.2, s. 74:** zwrot „Ra odznaczało się wartością 0,5 μm ” jest nieprecyzyjny. Zalecana jest modyfikacja do formy: „wartość parametru chropowatości Ra wynosiła 0,5 μm ”.
- **Rozdział 3.3, s. 78:** zwrot „przeprowadzono wyniki testów tribologicznych” jest niepoprawny. Zalecana jest modyfikacja do formy: „przedstawiono wyniki testów tribologicznych”.
- **Rozdział 3.3, s. 80:** zwrot: „Autorzy nie pokusili się (...)” jest kolokwializmem. Zalecane jest niestosowanie takich zwrotów w treści dysertacji doktorskiej.
- **Rozdział 4, s. 85:** zalecana jest poprawa błędu w nazwie „stale marging” na „stale maraging”.
- **Rozdział 4, s. 88:** proszę o wyjaśnienie, co Autor rozumie pod pojęciem „rozwinęta struktura geometryczna powierzchni”?
- **Rozdział 6.2, s. 96 – 97:** Autor zawarł w treści rozprawy informację, iż wytworzenie konwencjonalnych kół zębatych zlecono podmiotowi zewnętrznemu. Niestety w treści pracy nie odnalazłem bardziej szczegółowych informacji, jakie sposoby obróbki, typy narzędzi skrawających i ściernic (wraz z ich geometrią) oraz parametry obróbki zastosowano w badaniach? W mojej opinii, takowe dane są bardzo ważne w kontekście otrzymanych właściwości technologicznej warstwy wierzchniej (np. parametrów chropowatości obrobionej powierzchni, twardości i rozkładu naprężeń w TWW) konwencjonalnych kół zębatych. Zróżnicowanie wyżej wymienionych parametrów wejściowych procesów obróbkowych może mieć duży wpływ na TWW kół zębatych, a tym samym na przeprowadzoną w dysertacji analizę porównawczą

wytrzymałości zmęczeniowej kół zębatach konwencjonalnych, z kołami wytworzonymi przyrostowo techniką SLM.

- **Rozdział 6.2, s. 98 – 101:** Celem poszerzenia wiedzy czytelnika i umożliwienia powtórzenia przeprowadzonych badań, zalecane byłoby rozszerzenie opisu zastosowanych stanowisk pomiarowych o ich specyfikację techniczną i nastawy stosowane podczas pomiarów.
- W **rozdziale 7.2** Autor proponuje oryginalną metodykę wytwarzania przyrostowego SLM stali 21NiCrMo2, biorąc pod uwagę kryterium minimalizacji porowatości wytworzonych próbek. A może warto byłoby przeprowadzić procedurę wielokryterialnej optymalizacji parametrów wejściowych procesu SLM, uwzględniając jako kryteria optymalizacji: minimalizację porowatości przy jednoczesnej maksymalizacji wydajności wytwarzania? Takową procedurę można łatwo przeprowadzić w zastosowanym przez Autora rozprawie oprogramowaniu Statistica, stosując metodykę minimalizacji funkcji użyteczności całkowitej.
- **Rozdział 7.2.1, s. 112:** na rysunku 7.6 przedstawiono maksymalne wartości średniej porowatości wynoszące około 6%. Niemniej, na rysunku 7.5 maksymalna wartość średniej porowatości wynosi 5,3%? W związku z tym, czy wyniki przedstawione na obu rysunkach dotyczą innego obszaru danych wyjściowych?
- **Rozdział 7.2.1, s. 123:** Zdanie „Grupę 2.3 jako grupę odznaczającą się najwyższą wartością gęstości energii, (...) opisanych równaniami (7.4) i (7.5).” jest niezrozumiałe.
- **Rozdział 7.2.3, s. 131:** opis grup parametrów: „2.3, 2.11, 2.12, 2.3, 2.3” jest błędny.
- **Rozdział 8.4, s. 149:** zwrot: „w zakresie od -270 MPa (δ_{max}) w okolicach powierzchni próbki do -120 MPa (δ_{min})” jest błędny. Poprawna forma to: „w zakresie od -270 MPa (δ_{min}) w okolicach powierzchni próbki do -120 MPa (δ_{max})”.
- **Rozdział 9.1, s. 156:** zwrot „wierzchołka narzędzia skrawającego” jest niedokładny. Proszę o wyjaśnienie tego zwrotu.
- **Rozdział 9.1, s. 158:** według treści rozprawy czas wytwarzania jednego koła zębatego techniką SLM trwał blisko 17 h. Czas ten wydaje się relatywnie długi. Jaki był czas wytwarzania konwencjonalnego 1 koła zębatego (takiej informacji nie znalazłem w treści dysertacji)? Podanie niniejszej informacji jest bardzo ważne w kontekście porównania ekonomiki dwóch omawianych w pracy technologii wytwarzania kół zębatach.
- **Rozdział 9.1, s. 158:** Autor rozprawy zaproponował oryginalną metodykę odwzorowania w modelu CAD (a następnie w procesie wytwarzania SLM) zarysu ewolwentowego zębów koła zębatego. Czy w pracy porównano geometrię wytworzonego profilu ewolwentu koła wytworzonego przyrostowo z profilem koła obrobionego konwencjonalnymi technikami?
- **Rozdział 9.3.1, s. 171:** Na rysunku 9.16 Autor zaprezentował mechanizm powstawania porów otwartych na powierzchniach bocznych zębów podczas szlifowania. Warto podkreślić, iż na podstawie doniesień literaturowych, zmiana wielkości ziaren ściernych ściernicy (a w ten sposób promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej i efektywnego kąta natarcia) oraz grubości warstwy szlifowanej mogą wywierać wpływ na intensywność występowania porowatości na

obrobionej powierzchni. W związku z tym, celem dalszej minimalizacji występowania porowatości na obrobionej powierzchni kół zębatych, zalecane byłoby przeprowadzenie w dalszych badaniach, prób szlifowania kół wytworzonych techniką SLM w zakresie zróżnicowanych typów ściernic i parametrów szlifowania.

- **Rozdział 10.3, s. 205:** Autor zaobserwował nierównomierność rozkładu ubytków eksploatacyjnych na obwodzie wieńca zębatego. W tym przypadku ząb nr 5 charakteryzował się znacznie większym zużyciem w stosunku do pozostałych zębów. Co według Autora mogło być przyczyną tego stanu rzeczy? Czy w badaniach uwzględniono na przykład wpływ bicia promieniowego kół zębatych na rozkład obciążeń/naprężeń w przyporze kół zębatych?

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że mgr inż. Jakub Paweł Łuszczek zdefiniował, a następnie rozwiązał istotny i aktualny problem naukowy dotyczący zagadnienia trwałości zmęczeniowej stykowej i identyfikacji mechanizmów uszkodzeń kół zębatych ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM.

W ramach badań własnych zaproponował kompleksowe podejście do problemu badawczego obejmujące: opracowanie autorskiej i oryginalnej metodyki procesu technologicznego wytwarzania kół zębatych walcowych ze stali 21NiCrMo2 o ewolwentowym zarysie zębów z zastosowaniem techniki SLM, oraz kompleksowe badania zmęczeniowej trwałości stykowej kół zębatych. Wykonanie tych badań wymagało od Autora dużej wiedzy w obszarze technik wytwarzania przyrostowego, a także wytrzymałości materiałów. Świadczy to o wysokim poziomie naukowym Doktoranta i jednocześnie potwierdza jego gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Jakuba Pawła Łuszczka pt. *Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatych ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM* w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (art. 13 ust. 1 Ustawa z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016r., poz. 882)) i może stanowić **podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora** nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Może być, zatem dopuszczona do publicznej obrony. Ponadto, ze względu na nowatorstwo i kompleksowość podjętego w dysertacji tematu, a także pozyskanie nowej wiedzy naukowej w obszarze technik wytwarzania przyrostowego metali oraz tribologii kół zębatych, **wnioskuję o wyróżnienie** jej Autora mgr. inż. Jakuba Pawła Łuszczka.

Szymon Wojciechowski