

dr hab. inż. Tomasz Dziubek, prof. uczelni
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 27.09.2024

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pawła ŁUSZCZKA pt. „TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA STYKOWA I MECHANIZM USZKODZEŃ KÓŁ ZĘBATYCH ZE STALI 21NiCrMo2 WYTWORZONYCH TECHNIKĄ PRZYROSTOWĄ SLM”

Podstawa opracowania: pismo prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej "Inżynieria Mechaniczna" Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego z siedzibą w Warszawie z dnia 30 lipca 2024 r. nr 44/RDN IM/2024 dotyczące opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pawła ŁUSZCZKA.

1. Wstęp

Implementacja addytywnych metod wytwarzania charakteryzuje się szeroką ekspansją zarówno w przemyśle wytwórczym jak i w zakresie prototypowania. Metody druku 3D znajdują coraz więcej zastosowań w wielu obszarach nauki, ale również procesach wytwarzania elementów maszyn produkowanych z wszelkiego rodzaju materiałów niemetalowych jak i proszków metali. O ile tworzywa termoplastyczne, jak i fotoutwardzalne są szeroko rozwijane przez ich wytwórców oraz producentów drukarek, o tyle wzrost gamy materiałów dedykowanych do wytwarzania z proszków metali jest znacznie mniejszy. Wynika to w dużej mierze z kosztów opracowania takich materiałów oraz ograniczeń samych urządzeń. Część producentów drukarek 3D ogranicza ich użytkowników do używania materiałów, które są wyłącznie przez nich dostarczane. W dużej mierze, dostępne opracowania nie zawierają informacji jakie alternatywne materiały można byłoby stosować dla dostępnych na rynku urządzeń. Opis procesów projektowania, wytwarzania oraz obróbki post-procesowej, wykazują spory deficyt informacji dotyczących właściwości wytrzymałościowych elementów otrzymywanych w wyniku spiekania warstwowego proszków metali. Prace związane z tymi zagadnieniami wynikają z względnie prostego i zautomatyzowanego procesu wytwarzania elementów konstrukcyjnych o skomplikowanych geometrycznie kształtach i są szczególnie uzasadnione potrzebami przemysłu, który coraz częściej i chętniej wykazuje nimi

spore zainteresowanie. Wynika to z faktu, że technologie przyrostowe umożliwiają relatywnie szybkie wytworzenie prototypu czy gotowego wyrobu użytkowego bez konieczności stosowania i projektowania skomplikowanych narzędzi oraz procesów obróbki ubytkowej. Jednak należy podkreślić, że na obecnym etapie nie jest ekonomicznie uzasadnione takie podejście w przypadku produkcji wielkoseryjnej. Mimo to biorąc pod uwagę dynamiczny rozwój technik przyrostowych, uzasadnione jest poszukiwanie i implementacja nowych materiałów możliwych do zastosowania w tego typu procesach wytwarzania. Tym samym jawi się konieczność określenia właściwości mechanicznych, trwałościowych oraz wytrzymałościowych samych materiałów jak i wyrobów gotowych.

Z tego powodu powyższe informacje dowodzą, że tematyka pracy jest aktualna i podjęcie jej przez Doktoranta jest uzasadnione. Uważam, że wyniki badań zawartych w rozprawie mają potencjał aplikacyjny możliwy do zastosowania w praktyce przemysłowej w branżach związanych z budową i eksploatacją maszyn, przemysłem AGD czy lotniczym.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Pawła Łuszczka pt. „Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatach ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM” opisuje kompleksowo w sposób teoretyczny i doświadczalny zagadnienia przedstawione w tytule i sformułowane jako cel i zakres pracy. Na początku chciałbym zaznaczyć, że recenzowana praca ma charakter „mocno” interdyscyplinarny, a jej rozmiary są „potężne”. Wynika to z bardzo złożonej tematyki jaką Doktorant podjął w trakcie jej realizacji, co oczywiście nie jest zarzutem, a raczej jej zaletą.

Rozprawa składa się z 247 stron, zawartych w 11 ponumerowanych rozdziałach oraz wstępu i streszczenia pracy w języku polskim i angielskim, które nie są objęte numeracją podobnie jak zawarty w pracy wykaz literatury. Dysertacja zawiera poprawnie przygotowany i przedstawiony wykaz ważniejszych oznaczeń. Bibliografia obejmuje 208 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych w tym publikacje zwarte i czasopisma oraz 12 norm, które właściwie zostały przywołane w tekście rozprawy. Proporcje pomiędzy artykułami naukowymi i pozycjami książkowymi są właściwe i odpowiadają aktualnemu stanowi zagadnienia. Łącznie w rozprawie zamieszczono 144 rysunki oraz 29 tabel.

Pracę rozpoczyna *Wstęp*, który jest syntetycznym wprowadzeniem do podjętego w pracy tematu i poprzedzony jest wykazem najważniejszych skrótów, oznaczeń i akronimów. Trzy pierwsze rozdziały stanowią swoistą i szeroko opracowaną analizę stanu zagadnienia, dotyczącą tematyki niniejszej pracy i tak można by je było w całości zatytułować. Rozdział pierwszy dotyczy zastosowania przyrostowych metod wytwarzania dedykowanych dla struktur metalowych, który stanowi część analizy stanu zagadnienia. Tematyka kontynuowana w rozdziale drugim dotyczącym rozwoju technik przyrostowych w aspekcie wytwarzania kół

zębatach, zarówno z zastosowaniem proszków metali jak i tworzyw sztucznych. Prologiem do tego rozdziału są zagadnienia dotyczące ubytkowych technologii wytwarzania kół zębatach. W rozdziale trzecim Autor odniósł się do zagadnień związanych z badaniami wytrzymałości zmęczeniowej tytułowych obiektów, przedstawiając stosowane metody badań. Zawarte tutaj zostały zagadnienia dotyczące wytrzymałości kół zębatach wytwarzanych z zastosowaniem konwencjonalnych metod ubytkowych oraz technik addytywnych. Rozdział czwarty stanowi syntetyczne podsumowanie oraz wnioski analizy stanu zagadnienia podjętej w pracy problematyki. Przedstawiony w tej części materiał jest obszerny i kompleksowo ujmuje zagadnienia dotyczące przyrostowych technik wytwarzania oraz wpływu metody i parametrów procesu na właściwości wytrzymałościowe wytwarzanych elementów.

Opracowana i przedstawiona na podstawie literatury analiza stanu zagadnienia, pozwoliła na sformułowanie w rozdziale piątym właściwego naukowego celu i zakresu pracy dotyczących weryfikacji wpływu parametrów wytwarzania oraz obróbki post-procesowej na trwałość zmęczeniową stykową kół zębatach wykonanych metodą druku 3D ze stali 21NiCrMo2 z zastosowaniem technologii SLM. Jako cel użytkowy zdefiniowano określenie możliwości zastosowania stali 21NiCrMo2 do wytwarzania walcowych kół zębatach z zastosowaniem techniki SLM. W rozdziale tym wyodrębniono również szczegółowe zadania składające się na zakres niniejszej pracy.

Rozdział szósty precyzuje zaplanowany program badań, w którym określono wstępne parametry procesu wytwarzania oraz kształt próbek badawczych. Sprecyzowano również metody badawcze oraz dedykowane do nich urządzenia, jak również przedstawiono zadania wykonane w ramach post-procesu łącznie z użytą w tych działaniach aparaturą.

W rozdziale siódmym zawarty został opis dotyczący doboru materiału oraz zdefiniowanie i określenie wpływu parametrów procesu wytwarzania prototypów badawczych zgodny z zastosowaną techniką SLM. Ponadto Autor przedstawił wstępne wyniki badań mikrostruktury próbek oraz wytrzymałości statycznej. Przedstawione wyniki odniesione zostały do rezultatów badań wykonanych dla próbek wykonanych z zastosowaniem technologii ubytkowych z materiału konwencjonalnego. W oparciu o przeprowadzone badania Autor dokonał selekcji parametrów wytwarzania, które zostały zastosowane do wykonania zestawu próbek badawczych dedykowanych do dalszych etapów zaplanowanego wcześniej schematu badań.

Rozdział ósmy poświęcony został badaniom dotyczącym wpływu obróbki cieplno-chemicznej na właściwości zastosowanego materiału (stali 21NiCrMo2) w aspekcie zastosowanej techniki wytwarzania SLM. Autor przedstawił realizację procesu obróbki cieplno-chemicznej, a następnie określił jej wpływ na mikrostrukturę materiału. Przeprowadził również właściwe analizy twardości badanych próbek oraz wykonał badania dotyczące naprężeń własnych, jak i określenia w próbie statycznego rozciągania właściwości wytrzymałościowych. Poszczególne etapy procesu badawczego i jego wyniki odniesione zostały do materiału konwencjonalnego.

W rozdziale dziewiątym Autor przedstawił przyjętą metodykę opracowania geometrii modelu 3D-CAD koła zębatego, który był podstawą wykonania prototypów wykorzystanych w późniejszych próbach m.in. stanowiskowych. Ponadto zaakcentowany został proces wytwarzania prototypów kół badawczych, ich obróbka cieplno-chemiczna, obróbka wykańczająca oraz weryfikacja ich geometrii przeprowadzona z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej zrealizowanej na WMP Hexagon Dea. Ponadto niniejszy rozdział zawiera badania struktury powierzchni otrzymanych prototypów pod kątem porowatości powierzchni oraz twardości. Rozdział kończy syntetyczne podsumowanie dotyczące procesu wytwarzania badawczych kół zębatach otrzymanych w oparciu o przyrostową technikę SLM.

Kolejny rozdział (dziesiąty) prezentuje badania z zakresu zmęczeniowej trwałości stykowej, które zrealizowano z zastosowaniem stanowiska mocy zamkniętej. Zawarte zostały w nim informacje dotyczące samej metodyki badań, z opisem konfiguracji badań, wraz z rejestracją powstających w trakcie procesu badawczego zmian zmęczeniowych. Etap ten dotyczył zarówno kół zębatach wykonanych z materiału konwencjonalnego jak i wytworzonych w oparciu o proces przyrostowy. W rozdziale tym opracowano i przedstawiono analizy wyników badań kół zębatach wytworzonych z zastosowaniem konwencjonalnych ubytkowych metod wytwarzania oraz analogicznie kół wytworzonych metodą druku 3D w technologii SLM. Rozdział domyka opis mechanizmu zużycia współpracujących powierzchni boków zębów kół wykonanych techniką przyrostową.

W rozdziale jedenastym Autor przedstawił podsumowanie i wnioski końcowe z przeprowadzonych badań. W pierwszej części podsumowania została przedstawiona ogólna analiza wynikająca z otrzymanych wyników. Kolejna część tego rozdziału zawiera wnioski opracowane na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących trwałości zmęczeniowej oraz przebiegu rozwoju uszkodzeń współpracujących powierzchni zębów badanych par kół zębatach wraz z uwzględnieniem obróbki cieplno-chemicznej. Został on podzielony na czternaście sekcji, które precyzują i przedstawiają wnioski, opierające się na szczegółowej analizie uzyskanych wyników badań kół zębatach wytworzonych ze stali 21NiCrMo2 addytywną metodą SLM. Rozdział ten kończą przedstawione wg Autora najważniejsze oryginalne osiągnięcia wynikające z realizacji niniejszej pracy oraz wytyczne kierunki dalszych badań. Całość tego rozdziału została przygotowana z należytą starannością, a zamieszczenie syntetycznego i wyczerpującego podsumowania zapewnia możliwość zapoznania z wynikającymi z realizacji pracy wnioskami, które mają charakter naukowy oraz, co jest równie istotne, użytkowy.

3. Ocena rozprawy

Dynamiczny rozwój przyrostowych technik wytwarzania, który dokonuje się na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat stał się potężną niszą nie tylko dla działań zajmujących się prototypowaniem, ale również dla zastosowań przemysłowych. Udział druku 3D w zastosowaniach bezpośrednio produkcyjnych ciągle wzrasta, co czyni zasadnym prowadzenie badań z zakresu implementacji niestosowanych do tej pory materiałów produkcyjnych, w szczególności proszków stopów metali. Badanie i ocena wybranych parametrów wytrzymałościowych wyrobów uzyskiwanych bezpośrednio w wyniku procesu przyrostowego, ale również w wyniku obróbki post-procesowej, w tym cieplno-chemicznej są istotne z punktu widzenia rozwoju technologii addytywnych, ale również technologii hybrydowych skojarzonych bezpośrednio z przyrostowymi. Niezbędna w tym zakresie staje się weryfikacja właściwości użytkowych, a przede wszystkim wytrzymałościowych oraz trwałościowych elementów części maszyn i urządzeń wytwarzanych metodami druku 3D. Tym samym podjęta przez Doktoranta problematyka zastosowania stali 21NiCrMo2 do wytwarzania kół zębatach techniką przyrostową SLM oraz przeprowadzenie m.in. badań trwałości zmęczeniowej jest nader aktualna i zasługuje na uwagę.

Nieliczne uwagi dotyczące obszaru merytorycznego, czy badawczego rozprawy stanowią jedynie chęć uściślenia lub inspiracji do dyskusji oraz rozszerzenia niektórych zagadnień, które mogłyby być rozwinięte lub uzupełnione.

Dotyczy to wybranych następujących problemów:

- 1) Biorąc pod uwagę przeprowadzony proces modelowania geometrii zarysu zęba zastanawiająca jest słuszność jego decyzji, gdyż można było w pełni bezpiecznie zastosować generator kół zębatach np. w środowisku oprogramowania Autodsek Inventor, przeprowadzić symulację obróbki na modelach bryłowych, czy opracować procedury modelowania powierzchniowego. Wszystkie te metody umożliwiają uzyskanie właściwej geometrii szczególnie, że ewentualnie występujące błędy byłyby możliwe do skorygowania w trakcie obróbki post-procesowej. Zastosowana przez Doktoranta procedura modelowania, w moim przekonaniu naznaczona jest występowaniem błędów geometrii, które mogą wynikać z błędów wytwarzania geometrii wzorca jaki zastosował.
- 2) Zaprezentowany materiał mógłby być uzupełniony o mapy odchyłek modeli badawczych kół zębatach, gdyż nie wiadomo czy wszystkie z nich charakteryzowały się identycznym rozkładem odchyłek geometrii. Brak jest informacji w jaki sposób kojarzone były poszczególne pary współpracujące. Wskazane byłoby również zamieszczenie informacji dotyczących dokładności wykonania kół współpracujących oraz zębniaków wykonanych metodami ubytkowymi.
- 3) Wartym uzupełnienia byłyby informacje dotyczące zjawisk zachodzących na powierzchniach zębów kół współpracujących.
- 4) Czy ułożenia wypełnienia względem geometrii w kołach drukowanych może wpływać na występująca porowatość?

- 5) Zaprezentowana w części teoretycznej pracy konstrukcja stanowiska mocy zamkniętej odbiega od konstrukcji stanowiska zastosowanego w trakcie badań. Czy można sądzić, że rozbieżności te mogą wpływać na charakterystykę pracy badanych przekładni? Czym kierowano się w doborze liczby zębów kół pary współpracującej?

W trakcie lektury pracy natrafiono na szczerkowo występujące błędy interpunkcyjne oraz formatowania, które przekazano bezpośrednio Autorowi. Natrafiono również na sporadyczne niedociągnięcia natury edytorskiej lub językowej, do których można zaliczyć:

- „...Dla każdego z etapów wytwarzania można przyjąć różne techniki przyrostowe...” – str. 13,
- „...podczas ich eksploatacji jest występowanie pewnego złożonego stanu naprężeń...” – str. 59. – wg. mnie nie jest to precyzyjne określenie,
- rys. 7.21. – oznaczenie materiału konwencjonalnego MR, gdzie w pozostałych miejscach pracy oznaczany był jako MK,
- pracę dobrze byłoby uzupełnić o dokumentację konstrukcyjną kół wraz z tabelami parametrów, co zwiększyłoby jej czytelność,
- Autor stosuje wymiennie nazewnictwo „...stanowisko mocy zamkniętej/krażącej...”. Czy wg Niego obydwie nazwy są prawidłowe?

Przedstawione uwagi w dużej mierze można uznać, że mają charakter dyskusyjny i nie wpływają znacząco na wartość merytoryczną rozprawy. Dysertacja oparta jest na badaniach i analizie ich wyników, przeprowadzonych w oparciu o założony program z zastosowaniem szerokiego spektrum nowoczesnej aparatury badawczej do przeprowadzenia badań ujętych w rozprawie doktorskiej. Doktorant w procesie badawczym potwierdził założony cel pracy.

Recenzowana praca opiera się na badaniach, z których pierwsza część stanowi pewnego rodzaju wstęp do części zasadniczej, czyli badań twardości oraz zmęzeniowych próbek badawczych wykonanych z zastosowaniem wybranych parametrów procesu addytywnego oraz wpływu obróbki post-procesowej na właściwości wytrzymałościowe. Zaprezentowane w pierwszej części rozprawy syntetycznie zebrane informacje z zakresu zastosowania technik przyrostowych do wytwarzania struktur metalowych, jak i wykonany przegląd literatury dotyczący właściwości użytkowych elementów wytworzonych techniką SLM ze stali 21NiCrMo2, stanowi oryginalny wkład w część dotyczącą analizy stanu zagadnienia, ponieważ tego typu informacje generalnie nie są udostępniane i rzadko publikowane w opracowaniach naukowych.

Druga część rozprawy zawiera poprawnie przygotowany proces badawczy oraz skrupulatną analizę otrzymanych wyników z zakresu zdefiniowanego w tytule pracy. Z punktu widzenia programu badań, można tutaj wyróżnić szeroko rozwinięte zagadnienia dotyczące:

- 1) doboru parametrów wytwarzania kół zębatych w technologii SLM ze stali 21NiCrMo2 opartego o przegląd literatury oraz badania własne. Przedstawiona przez Doktoranta zmiana parametrów wytwarzania

umożliwiła wnikliwą analizę ich wpływu na właściwości użytkowe wytworzonych przyrostowo próbek,

- 2) analizy dobranych parametrów wytwarzania opartej o szczegółową analizę porowatości oraz twardości,
- 3) wykonania i przedstawienia wyników badań w zakresie statycznej wytrzymałości na rozciąganie poszerzonych mapami odkształceń uzyskanych na podstawie cyfrowej korelacji obrazu dla próbek przed i po obróbce cieplno-chemicznej,
- 4) przeprowadzenia badań z zakresu trwałości zmęczeniowej kół zębatych wytworzonych z zastosowaniem techniki SLM ze stali 21NiCrMo2 oraz porównania ich do zjawisk występujących w przekładni badawczej wytworzonej z zastosowaniem klasycznej technologii ubytkowej, które wykonano na stanowisku mocy zamkniętej,
- 5) opracowania szeregu analizy pod kątem zużycia powierzchni współpracujących wykonaną w oparciu o szczegółową dokumentację fotograficzną, w połączeniu z konstruktywnymi wnioskami popartymi często odwołaniem do pozycji literaturowych.

Opracowana przez Autora metodyka badań została właściwie dostosowana do zamierzonego i poprawnie zrealizowanego celu badawczego. Recenzowana praca charakteryzuje się logicznym spójnym i przemyślanym układem. Poziom edycyjny jest również na wysokim poziomie z ilustracjami i wykresami w sposób czytelny przedstawiającymi wyniki zrealizowanych badań. Metodyka badań oraz opracowane modele badawcze stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”. Stylistyka i język jakim została napisana wskazuje na bardzo dobre przygotowanie Autora do prowadzenia prac badawczych oraz Jego szeroką wiedzę w podjętej w niniejszej pracy tematyce. Praca posiada znaczący potencjał aplikacyjny, a merytorycznie zasługuje na wysoce pozytywną ocenę. Stwierdzam tym samym, że wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy ze względu na dużą liczbę przeprowadzonych badań oraz wykonanych na ich podstawie analiz, jak i znaczenie tematu.

4. Wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej oceny dysertacji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Pawła Łuszczka stwierdzam, że:

- wybór tematyki pracy został dokonany w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki objętej jej zakresem,
- przedstawione przez Doktoranta wyniki badań oraz wynikające z nich konstruktywne wnioski wnoszą nowe treści w wielu miejscach,
- zakres pracy spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, a podjęte w pracy zagadnienia zostały zrealizowane na właściwym wysokim poziomie,
- struktura i formalny układ pracy mimo występowania drobnych błędów są prawidłowe,

- wykonane przez Doktoranta analizy oraz przeprowadzone badania z zakresy przyrostowych metod wytwarzania i szeregu badań m.in. trwałości zmęczeniowej, opracowanie wyników, jak i wniosków nie budzą zastrzeżeń,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora,
- założenia przyjęte w pracy, wyniki badań oraz przeprowadzone na ich podstawie analizy mogą być przedmiotem dalszych prac naukowych,
- szata graficzna pracy, podobnie jak jej treść zostały opracowane na bardzo wysokim poziomie,
- rozprawa charakteryzuje się wysokim stopniem interdyscyplinarności, co wynika w głównej mierze z bardzo dużego jej zakresu, który został poddany szerokim analizom i badaniom, jednak jednoznacznie wpisuje się w dyscyplinę naukową „Inżynieria mechaniczna”.

W rozprawie Autor podjął się realizacji złożonego zadania badawczego, które nie wyczerpuje całości tematyki związanej z badaniami właściwości trwałościowych, czy wytrzymałościowych kół zębatach ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM oraz ich analizą. Prace związane z tymi zagadnieniami są szczególnie uzasadnione potrzebami przemysłu. Uważam, że jest to solidna podstawa do dalszych badań w celu otrzymania kolejnych rozwiązań dedykowanych do wdrożeń przemysłowych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego bardzo dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Jakuba Pawła ŁUSZCZKA pt.: „Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatach ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM” (promotor: prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK, promotor pomocniczy dr inż. Krzysztof GRZELAK) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku oraz dodatkowo Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, jednocześnie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

Dodatkowo, po zapoznaniu się z przedstawioną do oceny rozprawą doktorską stwierdzam, że stopień złożoności wykonanych badań oraz poziom merytoryczny pracy jaki został osiągnięty w wyniku jej realizacji jest podstawą do przyznania wyróżnienia.

