

prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK
ul. Lazurowa 185C m 122
01-476 Warszawa

Warszawa, dn. 31.08.2020 r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mariusza CIEPLAKA
pt. „Analiza geometryczna i wytrzymałościowa walcowych kół zębatach z kompozytów
polimerowych wytwarzanych wybranymi metodami Rapid Manufacturing”

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, Pana dr. hab. inż. Aleksandra Mazurkowa, prof. PRz nr RM-530-08-03/19/2020 z dnia 26 czerwca 2020 r.

1. Wstęp

Obserwowany od pierwszej dekady XXI wieku czwarty etap rewolucji przemysłowej, określany najczęściej jako Industry 4.0, utożsamiany jest bardzo często z rozwojem i wdrażaniem nowych technologii wytwarzania elementów o coraz bardziej złożonej geometrii i o dedykowanych właściwościach użytkowych. Rapid Manufacturing, jako wyodrębniona grupa z obszaru Rapid Technologii, obejmująca zbiór przyrostowych i hybrydowych technik wytwórczych umożliwiających wykonywanie gotowych, w pełni funkcjonalnych wyrobów możliwych do zastosowania jako elementy nośne czy konstrukcyjne maszyn i urządzeń, stanowi jedną z najbardziej perspektywicznych alternatyw dla konwencjonalnych technologii wytwarzania. Jednym z najintensywniej rozwijających się obszarów implementacji metod szybkiego wytwarzania jest przemysł elektromaszynowy w zakresie produkcji wielkoseryjnej elementów z tworzyw sztucznych. Istotną zachętą do coraz szerszego wykorzystywania tworzyw sztucznych w praktyce przemysłowej jest możliwość obniżenia zarówno kosztów wytwarzania konkretnych wyrobów jak i możliwość zmniejszenia ich masy. Bardzo często napotykanym ograniczeniem jest natomiast brak informacji dotyczących właściwości mechanicznych uzyskanych wyrobów, szczególnie w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej i zużycia eksploatacyjnego. W ostatnich latach coraz liczniejsza grupa ośrodków naukowych podejmuje badania dotyczące weryfikacji właściwości użytkowych elementów uzyskanych z wykorzystaniem metod szybkiego wytwarzania. W ten obszar wkomponowuje się recenzowana praca doktorska, w której podjęto kompleksową próbę wytypowania grupy kompozytów polimerowych dedykowanych dla technologii przyrostowych oraz technologii odlewania pod obniżonym ciśnieniem,

z zamiarem dedykowania tych kompozytów jako materiał konstrukcyjny na elementy układów napędowych pracujących pod zwiększonym obciążeniem.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mariusza Cieplaka składa się z 9 rozdziałów, w tym spisu literatury zawierającego 186 pozycji prac, na które Autor powołał się w tekście. Praca na 182 stronach jest ilustrowana rysunkami i fotografiami aparatury, stanowisk badawczych oraz prototypów kół zębatach. Łącznie w opracowaniu zamieszczono 159 rysunków, w tym 80 graficznych prezentacji wyników pomiarów zarysu i linii zęba kół po procesie wytwarzania i po badaniach zmęczeniowych oraz 17 tabel.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. W rozdziale tym, przywołując literaturowe zestawienia danych przemysłowych, wskazano na ciągle rosnące obszary wykorzystywania tworzyw polimerowych jako materiałów konstrukcyjnych i korzyści wynikające z możliwości ich zastosowania do wytwarzania elementów konstrukcyjnych stosowanych przede wszystkim w środkach transportu powietrznego, naziemnego i wodnego. Doktorant wskazuje jednocześnie na obszar swoich zainteresowań dotyczących wykorzystania technik przyrostowych do wytwarzania kół zębatach, który leży u podstaw sformułowanego w dalszej części rozprawy problemu naukowego.

Obszernej analizie literaturowej stanu wiedzy dokonano na podstawie wybranych publikacji i kilkunastu źródeł internetowych, a jej rezultaty przedstawiono w syntetyczny sposób na 9 stronach rozdziału drugiego. Przedstawione wyniki prac opublikowanych w zdecydowanej większości po 2010 roku dotyczą najczęściej tematyki obejmującej zagadnienia konstruowania i badania kół zębatach oraz dokładności ich wykonania. Znaczącą grupę stanowią również prace poświęcone tematyce związanej z przetwarzaniem tworzyw sztucznych jako materiału na elementy wykorzystywane w budowie maszyn. W podsumowaniu przeglądu literatury Doktorant podkreśla niewielką liczbę dostępnych publikacji dotyczących badań walcowych kół zębatach wytwarzanych z kompozytów polimerowych metodami Rapid Manufacturing, czym uzasadnia podjęcie tematu recenzowanej dysertacji. W szczególności zwrócono uwagę na konieczność zbadania wpływu szeregu czynników konstrukcyjnych i technologicznych związanych ze specyfiką wytwarzania kół zębatach metodami Rapid Tooling i Rapid Manufacturing na geometrię i właściwości wytrzymałościowe obiektów. Stąd też i cel oraz zakres pracy sformułowane w rozdziale trzecim. Jako cel rozprawy przyjęto przeprowadzenie analizy geometrycznej i wytrzymałościowej walcowych kół zębatach wykonanych z kompozytów polimerowych

wytwarzanych wybranymi metodami Rapid Manufacturing, do których zaliczono: technologie przyrostowe oparte na przetłaczaniu warstwowym materiałów termoplastycznych, trójwymiarowy druk z wykorzystaniem żywic fotoutwardzalnych oraz technologię Vacuum Casting polegającą na odlewaniu polimerowych kompozytów chemoutwardzalnych w formach silikonowych pod obniżonym ciśnieniem. Tak sformułowany cel pracy wymagał od Doktoranta realizacji szeregu badań teoretycznych i doświadczalnych, uzupełnionych pracami konstrukcyjnymi, obejmujących między innymi: badania właściwości mechanicznych materiałów polimerowych stosowanych w metodach Rapid Manufacturing, opracowanie konstrukcji i wytworzenie przekładni badawczej oraz prototypów kół, przeprowadzenie badań zmęczeniowych z wykorzystaniem zaprojektowanego stanowiska badawczego oraz pomiary dokładności geometrycznej wytworzonych kół zębatych przed i po badaniach zmęczeniowych. Pracochłonność i czasochłonność realizacji przyjętego zakresu pracy zwiłokrotnia fakt, że badaniom poddano koła zębate wykonane z wykorzystaniem czterech technik przyrostowych: PolyJet, Fused Deposition Modeling (FDM), Digital Light Processing (DLP) i Fused Filament Fabrication (FFF).

Rozdział czwarty, zatytułowany „*Badania doświadczalne obciążenia pary uzębienia kół przekładni i kompozytów polimerowych*”, Doktorant w przeważającej części poświęcił opisowi przedmiotu badań, wykorzystanych urządzeń do wytwarzania przyrostowego i próżniowego odlewania oraz stanowisk i aparatury badawczej wykorzystanych w dalszej, zasadniczej części rozprawy. Jedyne wyniki badań doświadczalnych zamieszczone w tym rozdziale dotyczą właściwości mechanicznych i temperatury mięknięcia wg Vicata nanokompozytów na osnowie żywic: poliestrowej (UP) i epoksydowej (EP). Nasuwa to zatem wątpliwość czy tytuł rozdziału został sformułowany adekwatnie do jego zawartości. Uwagi budzi również sformułowanie tytułu podrozdziału 4.2 „*Aparatura badawcza do wytwarzania prototypów*”. Trudno bowiem mówić o aparaturze badawczej do wytwarzania detali. Jako niewątpliwie godne uznania należy uznać opisane w podrozdziale 4.5, zaprojektowane i zbudowane przez Doktoranta stanowisko do badań wytrzymałości kół zębatych. Stanowisko to umożliwia programowaną, płynną regulację obciążenia badanych kół oraz rejestrację i graficzną prezentację bieżących wartości podstawowych parametrów pracy badanej przekładni w postaci: momentu skręcającego, prędkości obrotowej, temperatury i natężenia dźwięku emitowanego podczas pracy przekładni, które błędnie Doktorant przedstawia jako „głośność” tejże przekładni.

Wyniki badań dokładności wymiarowo-kształtowej kół zębatych wytworzonych przyjętymi technikami przyrostowego wytwarzania oraz odlewanych pod obniżonym

ciśnieniem zamieszczono w rozdziale piątym. Zakres przeprowadzonych pomiarów obejmował zarówno prototypy wytworzone przyrostowo, jak i koła zębate odlane w formach silikonowych. Do wytworzenia form silikonowych wykorzystano wzorce w postaci kół wytworzonych metodą PolyJet, charakteryzujące się największą dokładnością geometryczną. Za główny cel realizacji tego etapu badań przyjęto określenie dokładności geometrycznej kół po procesie wytwarzania oraz po przeprowadzeniu badań zmęczeniowych z uwzględnieniem zużycia powierzchni bocznej zębów. Pomiary przeprowadzono w oparciu o metodykę pomiaru kół badawczych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej P40 firmy Klingelberg. Analizy wyników przeprowadzonych badań geometrycznych dokonano na podstawie określonych klas dokładności badanych kół oraz klas: zarysu i linii zęba, podziałek, bicia promieniowego oraz grubości zęba. Ocenie poddano również topografię powierzchni bocznej zębów. Warto w tym miejscu podkreślić, że podczas wytwarzania z wykorzystaniem technologii FDM wykorzystano dwa materiały: ABS M30 i ULTEM, a odlewy kół wykonano z dziewięciu nanokompozytów na osnowie nienasyconych żywic: poliestrowej (UP) i epoksydowej (EP), z których do dalszych badań, po weryfikacji wymiarów, wytypowano pięć rodzajów materiałów. Doktorant w tabeli 5.3. (powołując się w tekście na tabelę 3) wprowadza oznaczenia wybranych kompozytów polimerowych opartych na osnowie żywicy poliestrowej, jednak czytelnik może mieć wątpliwości, którego materiału poszczególne oznaczenia dotyczą. Nie przywołano również w tekście numerów dość licznej grupy rysunków (rys. 5.2 – 5.21), na których zamieszczono wydruki protokołów z wyników pomiarów. W podsumowaniach badań zamieszczonych w podrozdziałach 5.3 i 5.5, zawierających syntetyczne ujęcie wyników pomiarów geometrycznych wytworzonych kół zębatach Doktorant wskazał, odsyłając czytelnika do tabeli 1 i tabeli 4 (mając na myśli zapewne tabele 5.1 i 5.2) na uzyskanie najdokładniejszych wydruków w przypadku zastosowania technologii przyrostowego wytwarzania DLP i PolyJet (10, 11 i 12 klasy dokładności). Zastosowanie odlewania próżniowego umożliwiło uzyskanie kół zębatach znajdujących się w większości przypadków poza 12 klasą dokładności.

Rozdział szósty poświęcono opisowi przebiegu i wyników badań stanowiskowych mających na celu określenie zależności pomiędzy zastosowanym materiałem kompozytowym a temperaturą pracy przekładni oraz natężeniem dźwięku generowanego podczas współpracy pary kół zębatach. Doktorant niepotrzebnie w pierwszym zdaniu podsumowania tego rozdziału pisze o dodatkowym celu, jakim miałyby być określenie wytrzymałości zmęczeniowej prototypów kół zębatach, podczas gdy ani w zakresie pracy, ani w części poświęconej prezentacji wyników badań doświadczalnych, wytrzymałość zmęczeniowa

badanych kół nie zostały ujęte. W praktyce ograniczono się do prezentacji przebiegów zmian momentu obrotowego, temperatury i natężenia dźwięku generowanego podczas współpracy pary kół zębatych w funkcji czasu pracy przekładni. Szkoda, że Doktorant nie przyjął konkretnego kryterium opartego na mierzonych wielkościach, w oparciu o które mógłby dokonać analizy porównawczej trwałości zmęczeniowej badanych kół. Takie podejście do badań zmęczeniowych z pewnością umożliwiłoby poszerzenie zakresu wnioskowania.

Dalsza część rozprawy dotyczy analizy wpływu przeprowadzonych badań zmęczeniowych na wyniki pomiarów zarysów i linii oraz topografii zębów rozpatrywanych kół zębatych. Trudno w tym przypadku mówić o analizie dokładności geometrycznej tychże kół, o której Doktorant pisze w tytule rozdziału siódmego, gdyż pojęcie dokładności należy przypisywać wynikom procesu wytwarzania. W rzeczywistości wyniki pomiarów przedstawione w tym rozdziale posłużyły do weryfikacji wymiarowo-kształtowej wytworzonych kół po przeprowadzonych badaniach zmęczeniowych. W podrozdziale 7.5 dokonano tabelarycznego zestawienia określonych klas dokładności wraz z wykresami słupkowymi „wahań grubości zębów” kół wykonanych metodą odlewania próżniowego. Niewątpliwie na krytyczną ocenę zasługuje rozpoczęcie tego podrozdziału od tabeli 7.5, bez wcześniejszego powołania się na nią. Nie wyjaśniono również, co Doktorant rozumie pod pojęciem „wahania”, które pojawia się podczas opisów wykresów zamieszczonych na rys. 7.21 i 7.43, ani na jakiej wysokości zębów dokonywane były pomiary tej grubości.

Rozprawę zamyka rozdział, w którym zamieszczono podsumowanie uzyskanych wyników badań. Doktorant, mimo bogatego materiału w postaci wyników badań, nie formułuje jawnie żadnych wniosków. W poszczególnych akapitach rozdziału można znaleźć naturalnie zapisy, które swą zawartością ujęciu wniosku odpowiadają. Są to na przykład zapisy: „Przeprowadzone badania potwierdziły (choć zapewne lepiej brzmiałoby sformułowanie: „Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły”), że kompozyty polimerowe odporne na podwyższone temperatury spełniają oczekiwania stawiane materiałom, z których można wytwarzać koła zębate” (str. 168¹²) lub „... metody Rapid Manufacturing mogą mieć zastosowanie do wytwarzania kół zębatych poddawanych podwyższonym obciążeniom i pracującym w trybie ciągłym charakterystycznym dla wybranych elementów układów napędowych stosowanych np. w przemyśle motoryzacyjnym.” (str. 168¹⁵). Wydaje się jednak, że w przypadku rozprawy naukowej taka forma prezentacji wniosków utrudnia jednoznaczną ocenę realizacji założonego celu pracy. Niewątpliwie najlepiej jest przedstawiać je w punktach ujmujących podsumowanie całości pracy w formie syntezy wniosków wynikających z poszczególnych rozdziałów.

3. Ocena rozprawy

Całość pracy pod względem merytorycznym zasługuje na pozytywną ocenę i nie budzi istotnych zastrzeżeń. Krytyczna ocena pracy wynika przede wszystkim z konieczności uściślenia niektórych zagadnień, pominiętych lub oszczędnie przedstawionych w rozprawie doktorskiej. Dyskusji oraz dodatkowych wyjaśnień i uszczegółowień wymagają następujące uwagi:

- 1) Doktorant w swojej pracy wybrał do badań prototypy kół zębatach wykonane metodami przyrostowymi z żywic utwardzanych w procesie fotopolimeryzacji oraz z materiałów termoplastycznych przetłaczanych z filamentów w procesie addytywnym. Pojawia się pytanie: dlaczego nie zostały poddane badaniom prototypy kół zębatach wykonane np. metodą selektywnego spiekania proszków polimerowych? Czy wynikało to z zasobów infrastruktury badawczej, którą dysponował Doktorant, czy była to celowa decyzja realizacji prac badawczych w obrębie przedstawionych materiałów?
- 2) W przypadku technologii przyrostowych badaniom poddano materiały dedykowane przez producentów zastosowanych drukarek 3D. Wybrane materiały są w większości kompozytami, zarówno w przypadku żywic optycznie czynnych jak i filamentów termoplastycznych. Ciekawym mogłoby być zastosowanie materiałów innych niż dedykowane przez producentów drukarek 3D.
- 3) Czy nie należałoby obszar badań poszerzyć o inne żywice z grupy chemoutwardzalnych materiałów konstrukcyjnych, czyli żywic epoksydowych lub poliuretanowych? Materiały te stosuje się również w procesach technologicznych z obszaru Rapid Manufacturing.
- 4) Doktorant opracował i zbudował stanowisko do badań zmęczeniowych z otwartym układem obciążania badanych kół. Zachodzi pytanie: czy w przypadku długotrwałych badań zmęczeniowych nie byłoby właściwym zastosowanie stanowiska z układem mocy krążącej?
- 5) W tabeli 5.3 (która w tekście jest oznaczona jako tabela 3), w której przedstawiono oznaczenia badanych kół zębatach, zamieszczona jest kolumna „Nr zlecenia”. Należałoby wyjaśnić, co to oznacza w odniesieniu do przedstawionych wyników badań.
- 6) Na jakiej podstawie wytypowano pięć materiałów, z których wykonano metodą Vacuum Casting prototypy kół zębatach przeznaczonych do badań trwałościowych?

- 7) Na stronie 96 wprowadzono w tekście oznaczenie kół zębatach jako 1 i 6 (str. 96₅). Można się domyślać, że oznaczenia te są tożsame z oznaczeniami 1_2 i 6_1 zamieszczonymi w tabeli 5.4 po pominięciu oznaczenia po dolnej kresce (). Należałoby to jednak wyjaśnić w treści rozprawy. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku opisu tabel: 5.5, 7.5 i 7.6 (strony: 97, 164 i 165).
- 8) Na wykresach zamieszczonych na rys.: 6.22, 6,24, 6.26 i kolejnych, głośność została wyrażona w [dB]. Co w rzeczywistości mierzył Doktorant, ponieważ [dB] jest jednostką natężenia dźwięku.

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

- 1) Niewłaściwego powołania się w tekście na rysunki 1.1 i 1.2 oraz brak powołań na rysunki 1.3, 1.4 oraz 2.1-2.5. W szeregu przypadków powołanie na rysunki ma miejsce po zamieszczonym rysunku.
- 2) Użycia do określenia znormalizowanych próbek określeń: „wiosełka” i „belecзки” (str. 37⁵).
- 3) Braku informacji dotyczącej temperatury mięknienia w Tabeli 4.5 (str. 38).
- 4) Podawania wartości temperatury w jednostkach [C] zamiast [°C] (rys. 6.8, rys. 6.12, rys. 6.15, rys. 6.20 i kolejne),
- 5) Dość licznych przypadków oszczędnego korzystania ze znaków interpunkcyjnych i akapitów.

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy w tekście, które przekazano bezpośrednio Autorowi do wykorzystania w przygotowaniu publikacji.

Przytoczone uwagi nie wpływają na ogólnie dobrą ocenę poziomu recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Autor wykazał się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych, a do Jego oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) Przeprowadzenie obszernej analizy dokładności geometrycznej kół zębatach wytworzonych wybranymi metodami Rapid Manufacturing, do których zaliczono technologie przyrostowe oparte na przetłaczaniu warstwowym materiałów termoplastycznych, trójwymiarowy druk żywicami fotoutwardzalnymi oraz technologię Vacuum Casting, opartą na odlewaniu pod obniżonym ciśnieniem w formach silikonowych polimerowych kompozytów chemoutwardzalnych.

- 2) Zbadanie właściwości mechanicznych i weryfikacja pod kątem możliwości aplikacji jako materiał na koła zębate wybranych nanokompozytów na osnowie małowcząsteczkowych żywic syntetycznych otrzymanych z wykorzystaniem metody wieloetapowej homogenizacji wszystkich badanych kompozycji. Doktorant udowodnił, że opracowane przez niego i zastosowane na koła zębate materiały kompozytowe charakteryzują się większą wytrzymałością niż materiał bazowy w postaci żywicy poliestrowej.
- 3) Opracowanie i zbudowanie stanowiska badawczego wykorzystanego podczas badań trwałościowych kół zębatach wykonanych metodami Rapid Manufacturing oraz przeprowadzenie badań trwałości zmęczeniowej wytworzonych kół.
- 4) Ocena wpływu długotrwałego obciążenia zmiennym momentem obrotowym kół zębatach wytworzonych z kompozytów polimerowych metodami Rapid Manufacturing na wyniki pomiarów zarysów i linii oraz topografii zębów i ocena przydatności tych metod wytwarzania w praktyce przemysłowej.

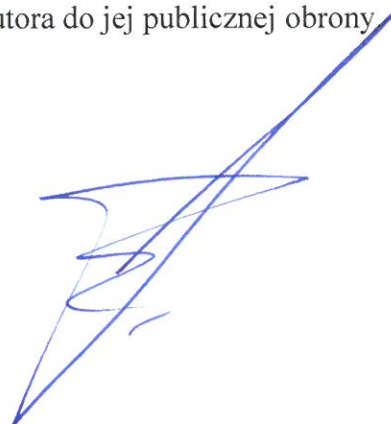
4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej wyżej oceny rozprawy Pana mgr inż. Mariusza Cieplaka wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- Doktorant posiada umiejętność zaprojektowania złożonych zadań naukowych i ich realizacji nowoczesnymi metodami,
- podjęte w rozprawie zadania zostały zrealizowane na właściwym poziomie,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, napisana jest poprawnym językiem technicznym i posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na właściwym poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr inż. Mariusza Cieplaka pt.: *„Analiza geometryczna i wytrzymałościowa walcowych kół zębatach z kompozytów polimerowych wytwarzanych wybranymi metodami Rapid Manufacturing”* (promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik, promotor pomocniczy: dr inż. Jadwiga Piusula) 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 Inżynieria Mechaniczna Politechniki
Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping, fluid strokes that form a stylized, abstract shape. The signature is positioned to the right of the main text block.