

Gliwice, 20.02.2023

dr hab. inż. Małgorzata Szymiczek, prof. PŚ
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Jabłońskiej
pt.: **“Wpływ parametrów druku 3D na własności
eksploatacyjne wybranej okrętowej części maszynowej”**

promotor: dr hab. inż. Wojciech Jurczak, prof. AMW
promotor pomocniczy: dr inż. Bogdan Szturomski

Podstawa opracowania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma z dnia 03.01.2023 r., które zostało podpisane przez Koordynatora Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Federacji Akademii Wojskowych, Pana dr hab. inż. Andrzeja Komorek, prof. LAW.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Moniki Jabłońskiej pt.: „Wpływ parametrów druku 3D na własności eksploatacyjne wybranej okrętowej części maszynowej” została zredagowana w języku polskim jako monografia licząca 140 stron wraz z załącznikami. Zawiera ona spis treści, wykaz ważniejszych skrótów, wstęp, osiem merytorycznych rozdziałów, spis literatury, streszczenie w języku polskim, a także oznaczeń oraz trzy załączniki.

Przedłożona do recenzji praca doktorska ma typową strukturę dla pracy naukowej. Autorka po krótkim wprowadzeniu i zdefiniowaniu problemu, dokonuje zwięzłego opisu stanu wiedzy w oparciu o najnowsze doniesienia literaturowe. Warto podkreślić, że ciekawym i nowatorskim rozwiązaniem jest pomysł zastosowania technologii druku 3D jako metody naprawy wybranej części maszynowej stosowanej na okrętach w warunkach morskich. Tak postawiony problem wymagał od Autorki interdyscyplinarnego podejścia, wiążącego inżynierię materiałową i mechaniczną z technologią budowy maszyn.

Rozdział pierwszy niniejszej pracy jest poświęcony analizie technologii przyrostowych: osadzaniu uplastycznionego tworzywa - FDM, stereolitografii - SLA, selektywnego spiekania laserowego - SLS, topienia wiązką elektronów - EBM, laserowego wykonanie ostatecznego kształtu i wymiaru - LENS, ukierunkowania osadzania energii - DED, selektywne stapianie wiązką lasera - SLM. Autorka przedstawia schematycznie zasady kształtowania detali wskazanymi metodami przy jednoczesnym uwzględnieniu ich zalet i wad. Przeprowadzona analiza oraz znajomość obszaru aplikacji w podrozdziale 1.2 pozwoliła jej na wygenerowanie kryteriów wyboru do analizy wielokryterialnej, która pozwoliła na wyselekcjonowanie metody FDM, jako technologii przydatnej do wytwarzania części zamiennych przy jednoczesnym zachowaniu zasad rachunku ekonomicznego. Autorka szczegółowo przedstawiła uwarunkowania technologii FDM uwzględniając szereg charakterystyk mających istotny wpływ na jakość gotowego elementu, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów, z których wytwarza się filamenty.

W rozdziale drugim Autorka przedstawiła genezę problemu badawczego podając wady i zalety obecnego podejścia do strategii zarządzania eksploatacją okrętu, które jest realizowane zgodnie z wymaganiami ISM Code, gwarantującymi spełnienie postawionego zadania. Jest to najczęściej stosowane podejście dostosowane do wymagań armatora. Należy podkreślić, że w obecnych realiach eksploatacji urządzeń okrętowych druk 3D nie jest stosowany do wytwarzania elementów (części zamiennych), zatem nie wchodzi w zakres Przepisów Klasyfikacji i Budowy Okrętów Wojennych. Na podstawie przeglądu literatury i danych z eksploatacyjnej dokumentacji ruchowej układów energetycznych, Doktorantka zdefiniowała przedmiot badań – wirnik okrętowej pompy transportowej.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego została sformułowana teza pracy, która brzmi:

„Wydruk 3D części okrętowej w technologii niemetalicznej 3D w sytuacjach awaryjnych, podczas eksploatacji w morzu zapewni wytworzenie potrzebnej części, która umożliwi naprawę uszkodzonej maszyny lub uszkodzenia i ciągłość pracy. Właściwości mechaniczne

i eksploatacyjne niemetalicznej części zapasowej zapewnią wymaganą trwałość w założonym okresie, czego konsekwencją będzie bezpieczeństwo techniczne żeglugi i personelu”.

Obok tezy zostały również zdefiniowane cele: główny, częściowy, poznawczy i użytkowy. Postawiona teza oraz zdefiniowane cele, były podstawą do opracowania metodologii badań eksperymentalnych, która uwzględniała m.in.:

- przygotowanie próbek badawczych dla zróżnicowanych parametrów druku 3D,
- oznaczenie własności wytrzymałościowych przy zginaniu i rozciąganiu,
- analizę własności mechanicznych z zastosowaniem metody elementów skończonych w programie CAE,
- badania własności fizyko-chemiczne próbek (w tym m.in. chłonności wody, porowatości).

Przeprowadzone prace i analizy pozwoliły Pani mgr inż. Monice Jabłońskiej na opracowanie technologii wytwarzania przyjętego obiektu badań tj. wirnika pompy okrętowej. W rozdziale 4 przedstawiono uzasadnienie wyboru przyjętego obiektu badań, a także opisano podstawowe charakterystyki eksploatacyjne, tj. użyteczną wysokość podnoszenia i ssania pompy, moc użyteczną pompy oraz sprawność.

Autorka w rozdziale 5 opisuje technologię wytwarzania badanego wirnika pompy metodą FDM. W ramach pracy zostały wytworzone trzy wirniki, które drukowano przy dwóch zróżnicowanych parametrach tj. wysokości warstwy i zwiększonej liczbie obrysów tworzących zewnętrzny kontur modelu. Dokładność odwzorowania wytworzonych wirników z poli(tereftalanu etylenu) modyfikowanego glikolem i wzmocnionego włóknem węglowym, Autorka zweryfikowała z użyciem skanera 3D, co pozwoliło jej na oszacowanie odchyłek wymiarowych w stosunku do wirnika modelowego.

W rozdziale 6 Doktorantka oceniła możliwości zastosowania wykonanych wirników do doraźnej naprawy wskazanej pompy. Celem badań weryfikacyjnych było wyznaczenie charakterystyk eksploatacyjnych pompy, sprawdzenie cech konstrukcyjnych, geometrycznych i wytrzymałościowych oraz trwałości wirnika. Badania weryfikacyjne przeprowadzono na stanowisku okrętowych pomp wirowych mieszczącym się w Laboratorium Eksploatacji Siłowni Okrętowych Akademii Marynarki Wojennej, które pozwoliło na symulację rzeczywistych warunków pracy. Badaniom poddano zarówno wirnik referencyjny (z brązu cynowego), jak i wytworzone w ramach pracy wirniki z poli(tereftalanu etylenu) modyfikowanego glikolem i wzmocnionego włóknem węglowym. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów Autorka określiła charakterystyki eksploatacyjne

poszczególnych wirników dla założonego pomiaru ciśnienia na tłoczeniu. W etapie końcowym pracy przeprowadziła ocenę stopnia degradacji badanych wirników.

W ostatnich rozdziałach pracy 7 i 8 Autorka dokonała podsumowania prac, przedstawiła główne osiągnięcia, wnioski oraz proponowane dalsze kierunki badań w podjętym obszarze badawczym.

Bibliografia dysertacji mgr inż. Moniki Jabłońskiej obejmuje 117 pozycji, wśród których można wyróżnić 95 pozycji literaturowych, z których zdecydowana większość pochodzi z ostatnich 20 lat i najczęściej są to artykuły z czasopism, które mają wysoki współczynnik impact factor, a także posiadają uznaną pozycję w międzynarodowym środowisku naukowym. W bibliografii nie wykazano ani jednej pozycji autorskiej lub współautorskiej Pani mgr inż. Moniki Jabłońskiej.

2. Tematyka rozprawy i problem badawczy

Podjęta w niniejszej rozprawie tematyka jest związana z potencjalnym zastosowaniem technologii przyrostowych do wytwarzania części zamiennych z materiałów polimerowych, w tym przypadku w pompach wirnikowych, w praktyce eksploatacyjnej jednostek pływających. Proponowane rozwiązanie jest nowatorskie i nisko kosztowe. W mojej ocenie może to jednak być tylko rozwiązanie doraźne. Aktualnie, technologie druku 3D nie są wykorzystywane do tego typu aplikacji w jednostkach pływających.

Dla uzyskania odpowiedniej jakości, niezwykle ważny jest dobór zarówno materiału, jak i technologii druku. Jest to ściśle ze sobą powiązane. Wybrana, w pracy technologia FDM, którą przetwarza się przede wszystkim filamenty z polimerowych materiałów termoplastycznych i ich kompozytów, jest najczęściej wykorzystywana ze względu na stosunkowo niskie koszty i nieskomplikowany proces realizacji, co niewątpliwie wpływa na jej atrakcyjność. Jakość elementów wytwarzanych jest ściśle uzależniona od parametrów realizacji procesu, tj. m.in. temperatury materiału, temperatury stołu, ewentualnie komory, prędkości druku, przyjętej ścieżki nakładania kolejnych warstw filamentu itd.

W niniejszej rozprawie postawiony przez Doktorantkę problem badawczy dotyczył właśnie wpływu parametrów druku 3D (metoda FDM) na własności eksploatacyjne wirnika pompy okrętowej.

Zastosowanie kompozytów o osnowie z termoplastycznych materiałów polimerowych, w tym przypadku poli(tereftalanu etylenu) modyfikowanego glikolem (kopoliester) i wzmacnianego włóknem węglowym jest ciekawym rozwiązaniem pozwalającym na podwyższenie własności eksploatacyjnych. Jednak ze względu na charakterystyki fizyko-chemiczne materiałów polimerowych należy zdefiniować warunki pracy zarówno środowiskowe (oddziaływanie ciepła, wody, smarów itd.) jak również obciążenia układu, często pracującego w złożonym stanie naprężenia i odkształcenia. Określenie warunków pracy jest kluczowe dla wyselekcjonowania odpowiedniego materiału. Wskazane czynniki mają kluczowy wpływ na zachowanie się materiału podczas eksploatacji, tym bardziej, że elementy drukowane metodą FDM wykazują anizotropię własności. Rozwój inżynierii materiałowej i mechanicznej pozwolił na poszukiwanie nowych rozwiązań związanych m.in. z technologią wytwarzania, własnościami fizyko-chemicznymi, możliwym recyklingiem itd., czego przykładem jest niniejsza praca.

Zatem z punktu widzenia walorów naukowych oraz użytkowych należy jednoznacznie uznać, że tematyka przedłożonej do recenzji dysertacji jest ważna oraz aktualna. Spełnia ona wymagania, jakie są stawiane pracom doktorskim, które są realizowane w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

3. Analiza i ocena merytoryczna rozprawy

Na podstawie merytorycznej analizy zakresu jak i treści przedłożonej rozprawy należy jednoznacznie stwierdzić, że wpisuje się ona w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna. Przedłożona do recenzji dysertacja Pani mgr inż. Moniki Jabłońskiej jest interesująca i wartościowa zarówno pod względem naukowym, jak również użytkowym. Chociaż w mojej ocenie Doktorantka większy nacisk położyła na praktyczne rozwiązanie problemu.

Doktorantka prawidłowo zrealizowała założone zadania badawcze, zaplanowała i przeprowadziła szeroko zakrojone eksperymenty, które pozwoliły na potwierdzenie postawionej tezy. Autorka w ramach pracy przeprowadziła zarówno badania charakterystyk materiałowych dla polilaktydu i poli(tereftalanu etylenu) modyfikowanego glikolem (kopoliester) i wzmacnianego włóknem węglowym (na próbkach przygotowanych zgodnie z odpowiednimi normami), jak i badania eksploatacyjne gotowego wirnika pompy okrętowej.

Efektom tych działań było wyznaczenie relacji pomiędzy charakterystyką materiału, wybranymi parametrami istotnymi w technologii FDM, a własnościami eksploatacyjnymi

wirnika pompy okrętowej, co może być przydatne do prognozowania przewidywanego czasu bezawaryjnej pracy przedmiotowego elementu. Na uwagę zasługują przeprowadzone badania eksploatacyjne prowadzone na stanowisku symulującym obiekt rzeczywisty. Wyniki tych badań potwierdzają przydatność takiego rozwiązania dla eksploatacji okrętów, jednak w mojej ocenie wymaga to rozszerzenia programu badań o inne parametry, które nie zostały uwzględnione w niniejszej dysertacji.

Warto zaznaczyć, że założony zakres pracy wymagał od Autorki znajomości szeregu metod badawczych, a także programów m.in. do analizy MES, obróbki obrazów (skanów), a przede wszystkim, co świadczy o jej dojrzałości naukowej, potrafiła uzyskane wyniki właściwie zinterpretować i sformułować poprawnie wnioski.

Za najważniejsze osiągnięcie Pani mgr inż. Moniki Jabłońskiej uważam logiczne i wewnętrznie spójne powiązanie wyników badań eksperymentalnych na każdym etapie pracy, którego efektem jest wytworzenie wirnika pompy okrętowej, zapewniającego ciągłość pracy układu pompowego jednostki. Wirnik oznaczony w pracy jako nr 3 został wydrukowany przy wysokości warstwy 0,12 mm i 4 warstwach zewnętrznych (temperatura uplastyczniania filamnetu wynosiła 260°C, temperatura stołu 70°C), przepracował ponad 48 godzin ciągłej pracy, dla ciśnienia tłoczenia 0,4 MPa (maksymalne obciążenie pompy). Wirnik, będący przedmiotem analiz w końcowym etapie pracy, wykazuje zbliżone charakterystyki do wirnika wytworzonego z brązu cynowego. Średnia moc użyteczna pompy przy zastosowaniu wirnika z brązu cynowego wyniosła 286 W (sprawność ogólna = 0,27), a dla wirnika z PETG CF 291 W (sprawność ogólna = 0,26), dla ciśnienia tłoczenia 0,4 MPa.

Warto podkreślić, że praca ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje obszar inżynierii mechanicznej i materiałowej. Autorka wykazała się umiejętnością interpretacji i analizy uzyskanych, co pozwoliło jej na osiągnięcie założonych celów dysertacji.

Recenzowana rozprawa została przygotowana z dużą starannością oraz poprawnie pod względem merytorycznym jak i językowym. Niemniej jednak kilka kwestii poruszonych w dysertacji budzi pewne zastrzeżenia:

- W przeprowadzonej analizie wielokryterialnej brakuje zdefiniowania wag poszczególnych, przyjętych kryteriów na ocenę danej technologii przyrostowej. Trudno tutaj się zgodzić, z wynikiem tej analizy. Przyjęta technologia FDM jest z całą pewnością tania i prosta, ale sprawą otwartą jest jakość wytwarzanych detali.

- Biorąc pod uwagę fakt, że celem pracy jest ocena wpływu parametrów druku 3D metodą FDM wydaje się, że uzasadnione byłoby dokładniejsze przedstawienie wpływu poszczególnych parametrów na jakość wyrobu.
- Na stronie 23 Autorka pisze: „Wymagana prędkość wytłaczania decyduje o średnicy wytłaczanego filamentu. Zbyt duża prędkość wytłaczania prowadzi do pęcznienia stopionego filamentu, a średnica ścieżki filamentu o przekroju kołowym nie będzie równa średnicy dyszy”. W teorii przetwórstwa materiałów polimerowych opisany mechanizm jest nazywany efektem Barusa, który jest zależny od wielu czynników. W mojej ocenie, to filament jest o założonej średnicy i prędkość nie ma wpływu na średnicę, natomiast na rozszerzenie strugi już tak, chociaż zależy od również od samego materiału filamentu i ewentualnie jego modyfikacji. Obserwowany efekt ma istotne znaczenie dla geometrii wytworzonego elementu i jego cech użytkowych.
- Myślę, że ciekawsze byłoby przeprowadzenie symulacji numerycznych zachowania się wirnika pompy podczas pracy (analiza stanu naprężenia i odkształcenia) niż samych próbek w trakcie statycznej próby rozciągania.
- Badane elementy pracują w złożonym stanie naprężenia i odkształcenia, co wpływa na mechanizm zniszczenia. Autorka w sposób pobieżny w rozdziale 6.3.4 opisała mechanizm zniszczenia, a dla dalszych prac i badań byłaby cenna wskazówka. Należy podkreślić, że przedstawiony w pracy materiał badawczy pozwoliłby na przeprowadzenie takich analiz.
- Ze względu na własności materiałów polimerowych, ważnym czynnikiem wpływającym na uzyskane wyniki są warunki prowadzonych badań. W związku z czym należałoby uzupełnić opis metodyki badań z uwzględnieniem typu i producenta filamentu, sposobu przygotowania i kondycjonowania próbek, prędkości prowadzenia badań, temperatury otoczenia, wilgotność itd. Czy przedstawione w tabeli 1.4 dane dotyczą materiału, z którego wytworzono wirnik pompy, czy są to dane pogładowe?

Poza tym:

- Autorka na stronie 30 przeprowadza ocenę kryterialną filamentów, a później analizę SWOT, w mojej ocenie nie jest do końca uzasadnione,
- W pozycjach literaturowych 96 – 103, 111, 113-115 nie wskazano daty dostępu,
- Brakuje nr stron 40 i 41 oraz podpisu pod schematem na stronie 40, chociaż sam schemat w dużym stopniu porządkuje pracę i wskazuje swego rodzaju związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy poszczególnymi etapami badań,

- Pracę należałoby uzupełnić o streszczenie w języku angielskim,
- Autorka nie ustrzegła się również drobnych błędów interpunkcyjnych, „literówek”, czy potocznego słownictwa

Wniosek końcowy

Należy podkreślić, że zawarte w mojej recenzji uwagi oraz sugestie nie wpływają na holistyczną ocenę rozprawy doktorskiej, która jest jednoznacznie pozytywna. Autorka wykazała się wiedzą, umiejętnością planowania eksperymentu, realizacją badań naukowych, oraz rzetelną oceną i interpretacją uzyskanych wyników, co świadczy o predyspozycjach do prowadzenia prac naukowych przy jednoczesnym bardzo praktycznym podejściu do rozwiązywania problemów i zadań naukowych. Teza została potwierdzona, a postawione cele osiągnięte. W mojej ocenie ważnym aspektem recenzowanej pracy jest potencjalna możliwość aplikacji jej wyników w eksploatacji wirnikowych pomp okrętowych.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Monika Jabłońskiej pt. „Wpływ parametrów druku 3D na własności eksploatacyjne wybranej okrętowej części maszynowej ”, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony.

