



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
inicjatywa doskonałości

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Dr hab. inż.
Andrzej Katunin
Profesor uczelni

Gliwice, dn. 30.12.2024

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Isyna Izzal Muna**

pt. „**Degradation of additively manufactured
polymer based composites under thermal conditions**”

1. Ogólna charakterystyka pracy

Kompozyty o osnowie polimerowej stanowią coraz częściej wykorzystywany materiał w zastosowaniach inżynierskich, przy czym, dzięki stale ulepszanym właściwościom, coraz częściej są one stosowane do wytwarzania odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych, działających pod znacznym obciążeniem termomechanicznym. Zakres zastosowań takich kompozytów obejmuje najbardziej wymagające zastosowania w elementach środków transportu, również w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Biorąc pod uwagę wymagania w zakresie wielofunkcyjności tych materiałów stawiane w poszczególnych branżach, a zatem wielomodalności rodzajów obciążeń i oddziaływań na elementy wykonane z kompozytów o osnowie polimerowej, określenie procesów degradacji oraz trwałości staje się zadaniem coraz trudniejszym. Z drugiej strony, rozwój nowoczesnych technik wytwarzania przyrostowego kompozytów wzmacnianych włóknem ciągłym stwarza dodatkową elastyczność w otrzymywaniu elementów o skomplikowanej postaci geometrycznej oraz pożądaných właściwościach mechanicznych w często istotnie zredukowanym przedziale czasowym w odniesieniu do konwencjonalnych technik wytwarzania. Jednak przyrostowe techniki wytwarzania wprowadzają dodatkowy czynnik, komplikujący procesy degradacji oraz możliwości przewidywania trwałości wykonywanych w ten sposób elementów. W opiniowanej rozprawie doktorskiej Autorka podjęła się rozwiązania problemu badawczego zawierającego powyższe czynniki w ocenie procesów degradacji kompozytów o osnowie polimerowej wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych. Wybór tematyki badań oceniam jako wymagający oraz trafny ze względu na coraz większą popularyzację technik wytwarzania przyrostowego kompozytów polimerowych oraz konieczność dokładnego zbadania mechanizmów ich degradacji, co ma istotne znaczenie przy projektowaniu i eksploatacji elementów wykonywanych z takich materiałów.

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

ul. Konarskiego 18a, pok. 407, 44-100 Gliwice
+48 32 237 10 69
andrzej.katunin@polsl.pl

NIP 631 020 07 36

ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056



HR EXCELLENCE IN RESEARCH





Zakres tematyczny opiniowanej rozprawy doktorskiej obejmuje badania eksperymentalne w zakresie właściwości mechanicznych oraz stabilności cieplnej kompozytów polimerowych wytwarzanych z wykorzystaniem przyrostowych technik wytwarzania w warunkach podwyższonej oraz obniżonej temperatury w różnych trybach oddziaływania cieplnego. Ponadto, na podstawie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych, Autorka opracowała model numeryczny, umożliwiający analizę i predykcję oddziaływania cieplnego na właściwości i mechanizmy degradacji badanych materiałów.

Rozprawa została przygotowana w języku angielskim i zawiera 100 stron maszynopisu oraz składa się ze streszczenia, wykazu publikacji Autorki, spisów treści, ilustracji, tabel oraz użytych w pracy skrótów, pięciu rozdziałów oraz spisu bibliografii.

W rozdziale 1. Autorka wstępnie zdefiniowała problem badawczy dot. identyfikacji mechanizmów degradacji cieplnej kompozytów polimerowych wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych, a także określiła cele badań.

Rozdział 2. zawiera przegląd literatury i stanu wiedzy w zakresie technik przyrostowych oraz materiałów wykorzystywanych do wytwarzania kompozytów polimerowych z ich wykorzystaniem ze szczególnym uwzględnieniem rodzajów umocnienia, a także zagadnień związanych z degradacją tych materiałów, będących przedmiotem badań w opiniowanej rozprawie, oraz technik badań nieniszczących i monitorowania stanu elementów wykonanych z kompozytów. Na tej podstawie Autorka określiła motywację do podjęcia badań w tym zakresie, a także zdefiniowała tezy rozprawy oraz określiła wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria mechaniczna.

W rozdziale 3. Autorka zawarła informacje o procesie wytwarzania kompozytowych próbek do badań oraz sposób oddziaływania cieplnego, definiując różne scenariusze, zawierające wygrzewanie w podwyższonych temperaturach oraz wychładzanie w temperaturach obniżonych celem określenia mechanizmów degradacji wytworzonych materiałów pod wpływem zmiennych warunków cieplnych. Próbkę przygotowane w taki sposób zostały poddane badaniom niszczącym w postaci testów quasi-statycznych na rozciąganie oraz skaningowej kalorymetrii różnicowej, a także badaniom nieniszczącym z wykorzystaniem technik obrazowania mikroskopowego. Wyniki badań zostały dogłębnie przeanalizowane, a na ich podstawie zdefiniowano charakterystyczne mechanizmy degradacji wytworzonych materiałów z wykorzystaniem technik przyrostowych. W szczególności, określono związki pomiędzy formowaniem defektów i uszkodzeń ze zmianami mikrostrukturalnymi polimeru w wyniku oddziaływania cieplnego na badane kompozyty oraz rolę fazy umacniającej na zachowanie stabilności wymiarowej i właściwości cieplnych kompozytów.

Rozdział 4. Przedstawia badania numeryczne w zakresie degradacji właściwości mechanicznych kompozytów wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych. W ramach tego rozdziału Autorka opisała podstawowe założenia do budowy modeli numerycznych, proces definiowania tych modeli oraz analityczne obliczenia na podstawie klasycznej teorii laminacji. W wyniku



przeprowadzonych prac, Autorka opracowała narzędzie numeryczne, pozwalające przewidywać degradację właściwości mechanicznych kompozytów wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych. Opracowane modele cechują się relatywnie wysoką dokładnością, co zostało udowodnione przez Autorkę poprzez wykonanie analizy porównawczej uzyskanych wyników z przeprowadzonych symulacji z wynikami eksperymentalnymi dla badanych kompozytów.

Rozdział 5. stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań oraz wytyczenie dalszych kierunków rozwoju badań w problematyce rozprawy. Autorka odniosła się do celu i tezy rozprawy, przedstawiając w sposób jawny dowody na spełnienie celu i udowodnienie zdefiniowanej tezy. Ponadto, Autorka podsumowała najważniejsze osiągnięcia pracy i zdefiniowała kierunki dalszych badań zarówno w zakresie rozwoju metod charakteryzacji procesów degradacji w kompozytach wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych oraz w zakresie rozwoju modelowania numerycznego celem zwiększenia dokładności predykcji procesów degradacji w tych materiałach w wyniku oddziaływania cieplnego.

Rozprawę kończy spis bibliografii, liczący 105 pozycji.

2. Cel rozprawy i tezy rozprawy

Problem badawczy został zdefiniowany w podrozdziale 1.1, gdzie na podstawie zdefiniowanych przesłanek i luk w obecnym stanie wiedzy w przedmiocie opiniowanej rozprawy Autorka określiła przedmiot badań oraz wkład w dyscyplinę Inżynieria mechaniczna. Problem badawczy dotyczy określenia mechanizmów degradacji cieplnej kompozytów polimerowych wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych w warunkach występowania ekstremalnych temperatur, zarówno obniżonych i podwyższonych w stosunku do temperatury otoczenia. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury w podrozdziale 2.1, Autorka zdefiniowała tezę główną i dwie tezy pomocnicze. Sformułowane tezy wskazują na możliwość określenia mechanizmów degradacji kompozytów polimerowych wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych poprzez kombinację badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych, a także możliwości modyfikacji drukarki do wytwarzania przyrostowego do celów wytwarzania kompozytów umacnianych włóknem ciągłym. Stwierdzam, że teza rozprawy została sformułowana w sposób poprawny. Ponadto, stwierdzam, że zdefiniowany problem badawczy nosi cechy oryginalności i został uzasadniony przez Autorkę poprzez przywołanie warunków eksploatacyjnych dla wybranych środków transportu, w tym transportu lotniczego i samochodowego. Potrzeba zbadania mechanizmów degradacji oraz umożliwienie predykcji tych mechanizmów uzasadnia podjęcie się badań, których wyniki zostały opisane w opiniowanej rozprawie. Na podstawie analizy całokształtu rozprawy stwierdzam, że badania nawiązujące do problemu badawczego i zdefiniowanej tezy głównej zostały poprawnie przeprowadzone. Zdefiniowane cele rozprawy zostały osiągnięte poprzez przeprowadzenie niszczących i nieniszczących badań



eksperymentalnych oraz opracowanie modeli numerycznych w celu określenia mechanizmów degradacji badanych materiałów w ekstremalnych warunkach cieplnych oraz predykcji procesów degradacji. Autorka jawnie uzasadnia osiągnięcie celów oraz potwierdzenie zdefiniowanej tezy głównej rozprawy w podrozdziale 5.1.

3. Ocena merytoryczna pracy

W opiniowanej rozprawie Autorka zaproponowała nowe podejście w ocenie degradacji cieplnej kompozytów o osnowie polimerowej wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych przy zastosowaniu technik badań niszczących oraz nieniszczących, a także zaproponowała model numeryczny, umożliwiający predykcję degradacji właściwości mechanicznych tych kompozytów w warunkach oddziaływania cieplnego, zarówno w zakresie niskich i wysokich temperatur.

Przeprowadzony przegląd literatury oraz aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy, przedstawiony w podrozdziale 2.1 zawiera opis aktualnie wykorzystywanych przyrostowych technik wytwarzania oraz materiałów wykorzystywanych w tych procesach wytwórczych. Szczególną uwagę Autorka poświęciła zagadnieniom wytwarzania kompozytów umacnianych włóknem krótkim i ciągłym oraz cząstkami umacniającymi wraz z dyskusją w zakresie podstawowych właściwości, zalet i wad poszczególnych podejść, co ma bezpośredni związek z tematyką rozprawy oraz tworzy podstawę do zdefiniowania tezy rozprawy. Autorka szczegółowo analizuje również procesy degradacji tych materiałów oraz charakterystyczne defekty i uszkodzenia dla tych materiałów, co również właściwie podkreśla celowość prowadzenia podjętych badań. Podrozdział 2.1.3 Autorka poświęciła przeglądowi zagadnień w zakresie technik badań nieniszczących i monitorowania stanu elementów konstrukcyjnych, wyszczególniając najczęściej stosowane techniki pomiarowe. Autorka nie przytacza natomiast bezpośrednich przykładów wykorzystania tych technik do badania materiałów, będących przedmiotem rozprawy. Ponadto, w dalszej części rozprawy Autorka skupia się na mechanicznej i fizykochemicznej ocenie procesów degradacji, nie wykorzystując i nie odnosząc się do treści zawartych w podrozdziale 2.1.3. Należy zatem uznać, że wspomniane treści nie stanowią istotnej wiedzy z punktu widzenia zakresu prowadzonych badań i należałoby je zastąpić przeglądem aktualnego stanu wiedzy w zakresie wykorzystanych w rozprawie technik pomiarowych. Autorka wspomina o tych technikach w końcowej części podrozdziału 2.1.3, jednak w opinii recenzenta nie jest on komplementarny i nie odzwierciedla pełnego stanu wiedzy w tym zakresie.

Opracowane podejście do charakteryzacji badanych materiałów oraz przedstawione wyniki badań jednoznacznie potwierdzają obecność procesów degradacji w wyniku oddziaływania cieplnego. Techniki badawcze, wykorzystane przez Autorkę zostały wybrane prawidłowo i pozwoliły na kompleksową ocenę procesów degradacji zarówno w zakresie właściwości mechanicznych i cieplnych. Przeprowadzone badania quasi-statyczne umożliwiły bezpośrednie zbadanie spadku

modułu Younga i wytrzymałości na rozciąganie dla próbek poddawanych oddziaływaniom cieplnym, a wyniki kalorymetrii różnicowej umożliwiły określenie procesów fizykochemicznych, zachodzących podczas oddziaływań cieplnych i tym samym dostarczyły dowody na występowanie procesów degradacji. Ostatecznie, Autorka podjęła się weryfikacji zaobserwowanych zjawisk poprzez przeprowadzenie badań mikro- i mikrostruktury badanych kompozytów z wykorzystaniem technik mikroskopowych, które ujawniły różne mechanizmy degradacji dla rozpatrywanych przedziałów temperaturowych. Wyniki, zawarte w rozdziale 3. należy uznać za komplementarne i wzajemnie uzupełniające się, co umożliwiło przedstawienie jednoznacznych dowodów dot. występowania degradacji w badanych kompozytach pod wpływem oddziaływania cieplnego oraz identyfikacji poszczególnych mechanizmów degradacji.

Przystawione w rozprawie modele numeryczne, mające na celu predykcję degradacji właściwości mechanicznych badanych materiałów w wyniku oddziaływania cieplnego cechują się stosunkowo wysoką dokładnością, co potwierdziła Autorka rozprawy, porównując uzyskane wyniki numeryczne z wynikami badań eksperymentalnych dla rozpatrywanych przypadków oddziaływania cieplnego na badane materiały. Przyjęte założenia przy opracowaniu modeli numerycznych oraz liczne uproszczenia, wynikające z reguły mieszanin oraz klasycznej teorii laminacji, nie wpłynęły istotnie na dokładność wyników symulacji numerycznych, co potwierdza wspomniana analiza porównawcza. Nie jest jednak jasne w jaki sposób zostały określone wartości wytrzymałości na rozciąganie w symulacjach numerycznych. Z uwagi na charakter niszczący przeprowadzonych badań quasi-statycznych, które Autorka opisała w rozdziale 3., do określenia wytrzymałości na rozciąganie należałoby zdefiniować kryterium zniszczenia z uwzględnieniem właściwości strukturalnych badanych kompozytów. Dotyczy to również obliczeń analitycznych z wykorzystaniem klasycznej teorii laminacji, gdyż przedstawiony aparat matematyczny w podrozdziale 4.4.1 umożliwia jedynie określenie stanu odkształceń/naprężeń przy rozpatrywanych scenariuszach oddziaływania cieplnego, co nie jest tożsame ze zniszczeniem materiału przy osiągnięciu odkształceń/naprężeń uzyskanych z przeprowadzonych obliczeń.

Rozprawa została napisana w sposób poprawny, treści w pracy zostały przedstawione we właściwej kolejności.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W wyniku lektury pracy zostały sformułowane poniższe komentarze, uwagi krytyczne i dyskusyjne.

- 1) W podrozdziale 1.1 zatytułowanym „Problem statement” Autorka przywołuje liczne zastosowania kompozytów polimerowych wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych, a także odnosi się do warunków eksploatacyjnych przy których występują temperatury ekstremalne. Pomocnym byłoby odniesienie się do poszczególnych rozwiązań i zastosowań poprzez cytowanie odpowiedniej literatury.

- 2) W podrozdziale 2.4 Autorka odnosi się do zawartości rozdziałów w czasie przyszłym. Z uwagi na fakt, że badania zostały przeprowadzone i zakończone, należałoby odnosić się do wspomnianych treści w czasie przeszłym. W szczególności dotyczy to odniesienia się do zawartości rozdziału 2, gdzie opis zawartości znajduje się na końcu tegoż rozdziału. W tej sytuacji należałoby zrezygnować z opisu zawartości rozdziału 2. w celu zachowania spójności treści pracy.
- 3) Przegląd literatury w zakresie technik badań nieniszczących oraz monitorowania stanu elementów konstrukcyjnych często ma charakter podstawowej wiedzy w zakresie ich wykorzystania, a związek z tematem i problematyką pracy jest luźny. Autorka nie omawia zastosowania wspomnianych technik do badania kompozytów polimerowych wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych. W niektórych przypadkach wymienione techniki badań nieniszczących i monitorowania stanu nie mogłyby być zastosowane do badania wspomnianych materiałów ze względu na ograniczenia fizyczne tych technik lub ich zastosowanie nie byłoby ekonomicznie uzasadnione.
- 4) W jaki sposób została ustalona optymalna temperatura, przy której wytwarzano próbki zmodyfikowaną techniką przyrostową? Jakie czynniki były brane pod uwagę przy ustaleniu tej temperatury?
- 5) W jaki sposób zostały ustalone parametry oddziaływania cieplnego na wytworzone próbki, zwłaszcza intensywności grzania i chłodzenia? Jakie rzeczywiste procesy symulowały przeprowadzone eksperymenty?
- 6) Jakie jest źródło przyjętych właściwości termomechanicznych przedstawionych w Tabelach 4.1 i 4.2? Czy są one wynikiem badań eksperymentalnych, obliczeń, czy założeń na podstawie literatury?
- 7) Jakie były przyjęte kryteria zniszczenia przy wyznaczaniu wytrzymałości na rozciąganie w modelu numerycznym?

Uwagi redakcyjne:

- 1) Zastosowane w pracy skróty, mimo listy skrótów umieszczonej na początku rozprawy, są w licznych przypadkach wielokrotnie ponownie zdefiniowane w tekście rozprawy.
- 2) W rozdziale 4.1 Autorka odnosi się do niezamieszczonego w pracy rysunku.

Praca zawiera uchybienia redakcyjne, w tym błędy gramatyczne i interpunkcyjne. Nie mają one jednak istotnego wpływu na jakość merytoryczną rozprawy oraz nie umniejszają wartości osiągniętych wyników w ramach przeprowadzonych prac badawczych.



5. Ocena końcowa

Badania, przedstawione w opiniowanej rozprawie doktorskiej charakteryzują się nowatorstwem w zakresie charakteryzacji procesów degradacji kompozytów wytwarzanych z wykorzystaniem technik przyrostowych pod wpływem oddziaływania cieplnego. Autorka, mimo wspomnianych nieścisłości w treści rozprawy, wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, co jest potwierdzone przez przedstawione w pracy wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych oraz ich analizę. Opracowane podejście jest zgodne z zakresem zagadnień obejmujących dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna oraz stanowi wkład do tejże dyscypliny. Autorka demonstruje posiadanie niezbędnej wiedzy teoretycznej i praktycznej w zakresie dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, a także umiejętność przygotowania publikacji w czasopismach i wydawnictwach zwartych.

Stwierdzam, że przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Isyna Izzal Muna stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2023 poz. 742 ze zm.), i wnioskuję do Rady Naukowej w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.