

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Isyny Izzal Muna

nt.” Degradation of Additively Manufactured Polymer Based Composites under Thermal Conditions „

przedstawionej na Radzie Naukowej IMP PAN w Gdańsku

Recenzję wykonałam na podstawie pisma RN-421- 4/24 z dnia 15 stycznia 2025r. od z-cy dyrektora ds. naukowych sygnowanego przez dr hab. inż. Grzegorz Żywicę, prof. IMP PAN.

I. Zakres opiniowanej rozprawy

Wiele branż gospodarki wymaga materiałów, które powinny cechować się pożądanymi właściwościami mechanicznymi i strukturalnymi adekwatnymi do danej aplikacji technicznej, przy czym poszukuje się różnych metod ich wytwarzania dających możliwość obniżenia kosztów produkcji przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej jakości wyrobu.

Dobór konkretnych materiałów na elementy konstrukcji następuje w oparciu o już sprawdzone efekty mechanicznego zachowania się różnych materiałów, w różnych warunkach, najpierw w procesach wytwarzania określonych wyrobów z tych materiałów a następnie zastosowania ich w określonych warunkach eksploatacji. Z tego punktu widzenia należy zwrócić uwagę na efekty wykorzystywania procesów tradycyjnych oraz proponowanych nowych technik wytwarzania. W przypadku materiałów kompozytowych ma to szczególne znaczenie, z uwagi na złożoność struktury wewnętrznej i konieczność opanowania możliwych przyszłego zachowania tych materiałów jako produktu finalnego czy elementu konstrukcji.

Przykłady zastosowań materiałów kompozytowych w różnych branżach gospodarki pokazują zasadnicze spektakularne efekty wykorzystania tych materiałów. Gdy oczekuje się elementów konstrukcyjnych jednocześnie lekkich, wytrzymałych, odpornych na korozję i niezawodnie funkcjonujących w temperaturze niskiej i wysokiej to tylko określone materiały kompozytowe mogą spełnić te wymagania.

W przypadku kompozytów CFRP powszechnie stosowanymi osnowami są żywice epoksydowe lub fenolowe, należące do termo-i chemoutwardzalnych duroplastów. Zastosowanie tego typu materiałów jako osnowy, daje szerokie możliwości w zakresie wytwarzania skomplikowanych konstrukcji, zarówno z użyciem technologii autoklawowej, jak i bez autoklawowej (OoA). Prefabrykaty, z których wytwarza się konstrukcje lotnicze noszą nazwę prepregów i są tkaninami lub jednokierunkowymi taśmami włókien węglowych przesyconych żywicą. Produkcja konstrukcji lotniczych z prepregów z zastosowaniem technologii autoklawowej w znaczny sposób podnosi jakość wytwarzanych struktur, a zatem poprawia ich właściwości fizyczno-mechaniczne. Kompozyty, w których wykorzystywane są prepregi CFRP, można wytwarzać również bez użycia drogich autoklawów, co pomimo nieco niższej jakości wyrobu w stosunku do poprzedniej metody jest dużo tańsze. Termoplastyczny CFRP (CFRTP) i poza autoklawem (OoA) CFRP są obiecującymi systemami materiałowymi i mogą być używane jako konstrukcje płatowca ale też jako elementy konstrukcji zastosowane

w silnikach turbowentylatorowych. Wysoka odporność na uderzenia CFRTP pozwala na stosowanie ich w łopatkach wentylatorów, a także w obudowach wentylatorów. Odporność CFRP na wysoką temperaturę pozwala na stosowanie do ram wewnętrznych. Zapewnienie jakości jest jednak kluczową kwestią, którą należy rozwiązać, zanim materiały te będą mogły być powszechnie używane w samolotach.

Kompozyty CFRP są szeroko stosowane w branży motoryzacyjnej, np. w produkcji wysokiej klasy samochodów wyścigowych. Niska waga jest niezbędna do uzyskania wysokich osiągnięć samochodów. Układanie włókien węglowych w określonych kierunkach zwiększa wytrzymałość mechaniczną. Z kompozytu wykonuje się podwozia, ramy, części karoserii a także klatki bezpieczeństwa. Materiał CFRP stosowany jest też w budownictwie, do zwiększenia nośności konstrukcji (np. mostów), co pozwala na przenoszenie znacznie wyższego obciążenia, czy na odporność na ruchy sejsmiczne. Wykorzystuje się go także do napraw uszkodzonych struktur. Kompozyt CFRP znalazł zastosowanie w artykułach sportowych takich jak rowery, głównie wyścigowe. Rama z włókna węglowego jest bardzo lekka a dobrze ułożone włókna węglowe maksymalizują sztywność i minimalizują ryzyko awarii. Inne artykuły sportowe to rakietki tenisowe, tyczki, wędki czy wiosła. Materiały te stosowane są też na elementy konstrukcji w energetyce wiatrowej (łopaty turbin)

Istnieją różne ww. **techniki tradycyjnego wytwarzania kompozytów**, w tym CFRP. Inne różne techniki np. technologie addytywne stanowią stosunkowo nową propozycję procesu wytwarzania zaawansowanych materiałów kompozytowych CFRP. Wymaga to jednak szerokich badań, które pozwoliłyby na jej upowszechnienie.

Wobec tak **różnych zastosowań i różnego rodzaju obciążeń wyrobów kompozytowych CFRP** w różnych warunkach eksploatacji bardzo ważnym jest dobór i przeprowadzanie właściwych badań, których wyniki gwarantowałyby odpowiednią jakość wyrobu i bezpieczeństwo funkcjonowania.

Do takich zasadniczych badań **diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej** należą badania przeprowadzane w warunkach odpowiadających warunkom zastosowania danego tworzywa: badania trwałości termoplastów, rzadziej tworzyw termoutwardzalnych, podczas oddziaływania czynników pogodowych w różnych strefach klimatycznych, wpływu stabilizatorów na prędkości starzenia, wpływu ciepła oraz specjalnych środowisk i prognozowanie właściwości na podstawie pomiarów krótkotrwałych, oddziaływania wielu czynników jednocześnie, zastosowania analizy statystycznej przy opracowywaniu wyników pomiarów. Badania takie pozwalają na opracowanie sposobów **ochrony przed degradacją** tych stosunkowo nowych materiałów.

Degradacja jest procesem zmian strukturalnych, mogących być wynikiem przemian fizycznych lub chemicznych, zachodzących w tworzywach polimerowych pod wpływem długotrwałego działania czynników zewnętrznych, takich jak: ciepło, tlen, ozon, promieniowanie świetlne, promieniowanie wysokoenergetyczne, promienie UV, substancje chemiczne, w tym również woda i para wodna oraz naprężenia mechaniczne a szczególnie cyklicznie zmieniające się naprężenia dynamiczne (prowadzące do zmęczenia materiału), wywołujących pogorszenie pierwotnych właściwości użytkowych.

Problem zidentyfikowania mechanizmów degradacji, opisanie czynników i ich wpływu na te zjawiska może pozwolić na właściwy dobór parametrów materiałów i procesów ich wytwarzania, co stanowi zawsze właściwą podstawę projektowania procesów i konstrukcji, tu kompozytowych. Jednym z najważniejszych problemów utrzymania wysokiej jakości wyrobów kompozytowych jest zagrożenie degradacją termiczną.

Stąd analizowany w niniejszej rozprawie **problem degradacji termicznej** jest niezwykle ważny i podjęcie tego tematu bardzo uzasadnione. Badania w tym zakresie stanowią podstawę postępu w opracowaniu metod wytwarzania wyrobów kompozytowych i dostosowywania ich finalnych właściwości do różnych pożądanых aplikacji. Informacja o oczekiwanych cechach kompozytów polimerowych wytwarzanych metodami przyrostowymi (3D) jest bardzo ważna w procedurze projektowania zaawansowanych wyrobów kompozytowych , zwłaszcza w odniesieniu do cech takich kompozytów wytwarzanych tradycyjnie.

Przedstawiona w pracy adekwatna charakteryzacja degradacji termicznej kompozytów CFRP wytwarzanych przy użyciu AM w ekstremalnej temperaturze powyżej i poniżej zera jest niezbędne do zrozumienia ich ograniczeń i opracowywania strategii mających na celu zwiększenie ich niezawodności w dedykowanych aplikacjach .

Badania w tej dziedzinie mogą doprowadzić do opracowania zaawansowanej formuły CFRP, techniki produkcji oraz modeli (prototypy) w celu zoptymalizowania konstrukcji i wydajności tych materiałów w ekstremalnych warunkach. Wiedza ta może przyczynić się do postępu we ww. wielu branżach: lotniczej, motoryzacyjnej, sporcie, energetyce wiatrowej i innych. zapewniając bezpieczeństwo, niezawodność i integralność konstrukcji elementów CFRP w różnych warunkach pracy

Postęp w technologii wytwarzania przyrostowego otworzył nowe możliwości produkcji złożonych komponentów CFRP o dostosowanych właściwościach. Jednak wydajność CFRP AM w ekstremalnych warunkach temperaturowych wymaga intensywnych badań. Uzyskanie danych pozwalających na zrozumienie procesu degradacji termicznej CFRP wytwarzanego addytywnie może ułatwić opracowanie modeli predykcyjnych i narzędzi symulacyjnych do oceny cech tych materiałów w ekstremalnych warunkach.

Struktura dysertacji obejmuje 5 rozdziałów :

W rozdziale 1 przedstawiono wprowadzenie ujmujące zwięzły opis problemu naukowego w dysertacji oraz zasadniczy cel przeprowadzanych badań wraz z uzasadnieniem ich podjęcia.

Rozdział 2 dotyczy stanu wiedzy na temat wytwarzania przyrostowego kompozytów CFRP, w tym zarys historii AM z przykładami aplikacji. Zaprezentowano różne techniki i materiały drukowane metodami AM oraz dokonano przeglądu sposobów wykrywania uszkodzeń materiałów AM i procesu ich degradacji

W rozdziale 3 przedstawiono metodę doświadczalną obejmującą proces produkcji kompozytów CFRP metodą FDM, obróbkę termiczną drukowanych próbek przy różnych wartościach temperatury (ujemnej, dodatniej) i czasu ekspozycji (ciągłej, podwyższonej, cyklicznej). Przedstawiono charakterystykę struktury morfologicznej poddanej badaniu w celu ujawnienia porowatości, różnych defektów i uszkodzeń w obrębie tych struktur używając odpowiednio dobranych metod nieniszczących (NDT). Właściwości termiczne części kompozytowych wydrukowanych w 3D określono za pomocą użycia różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) a próbę rozciągania zrealizowano w celu określenia właściwości mechanicznych próbek AM.

Rozdział 4 dotyczy wykorzystania metody numerycznej do badania wpływu obróbki cieplnej na wytrzymałość mechaniczną materiałów drukowanych w 3D z wykorzystaniem modelowania metodą elementów skończonych (MES) i klasycznej teorii laminatów (CLT). Uzyskane wyniki liczbowe porównywano z wynikami doświadczalnymi. Przedstawiono

szczegółową analizę wad mikrostrukturalnych i orientacji włókien będących wynikiem procesów drukowania oraz dokonano analizy rozciągania i mechanizmu uszkodzeń.

Rozdział 5 zawiera wnioski, które zwięźle przedstawiają najważniejsze ustalenia i wyniki pochodzące z badań przeprowadzonych w ramach dysertacji. W oparciu o wnioski nakreślono potencjalne kierunki przyszłych badań z sugestią obszarów rokujących korzystne rozwiązania.

Zakres merytoryczny prezentowanych w pracy badań zawiera koncepcję opartą na dogłębnej analizie stanu zagadnienia obejmującego: **charakteryzacje wytwarzania przyrostowego**, materiały drukowane metodą wytwarzania przyrostowego (kompozyty polimerowe wzmocnione krótkim włóknom węglowym (SCFRP), kompozyty polimerowe wzmocniane ciągłym włóknom węglowym (CCFRP), nanokompozyty, wykrywanie uszkodzeń materiałów wytwarzanych addytywnie, (monitorowanie stanu konstrukcji-SHM, monitorowanie drgań, monitorowanie odkształceń, monitorowanie oparte na propagacji fal, inne techniki wykrywania), degradacja materiałowa kompozytów wytwarzanych przyrostowo (degradacja właściwości, pękanie, skurcz).

Wskazane **cele główne** niniejszej pracy to: 1), wykonanie badań eksperymentalnych i numerycznych dotyczących degradacji termicznej wytwarzanych kompozytów CFRP drukowanych techniką AM, w szczególności z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody modelowania osadzania topionego (FDM), 2) zastosowanie kompozytów CFRP w wytwarzaniu przyrostowym oraz poznanie mechanizmów leżących u podstaw degradacji termicznej.

Przedstawione w pracy wyniki badań przyczyniają się do lepszego zrozumienia postawionego problemu i możliwości związanych z wykorzystaniem kompozytów CFRP w różnych warunkach temperaturowych. Technologie przyrostowe zrewolucjonizowały produkcję CFRP, umożliwiając tworzenie skomplikowanych struktur z precyzyjną geometrią i konfigurowalnymi cechami. CFRP są narażone na różne warunki środowiskowe i jeden z najbardziej wpływających czynników to temperatura. CFRP są podatne na degradację materiału po wystawieniu na działanie promieniowania cieplnego, na ekstremalne temperatury, które mogą zagrozić ich właściwościom mechanicznym i integralności strukturalnej.

Problem degradacji materiału w CFRP AM w różnych branżach i zastosowaniach wymaga zrozumienia i identyfikacji procesów je powodujących. Poznanie tego zjawiska oraz współzależności między czynnikami go powodującymi może pomóc w opracowaniu sposobów możliwego jej ograniczenia i wskutek tego do zwiększenia niezawodności konstrukcji gdzie mogą zostać zastąpione materiały wytwarzane w tradycyjny sposób przez AM. Różnice w strukturze materiałów CFRP między addytywnie a tradycyjnie wytworzonymi elementami będą prowadzić do różnic w procesach degradacji i to wymaga przebadania.

Zaproponowane w pracy szczegółowe badania wpływu różnych procesów obróbki termicznej na właściwości mechaniczne, stabilność termiczną i charakterystyki morfologiczne kompozytów z polimeru wzmocnionego ciągłym włóknom węglowym (CCFRP) drukowanych przy użyciu zmodyfikowanej drukarki FDM znajdują odzwierciedlenie w przedstawionym programie realizacji pracy.

Wyniki obserwacji zjawisk zachodzących podczas procesu wytwarzania kompozytu CFRP, jego eksploatacji w szczególności wywołującej zjawisko degradacji, głównie termicznej z wykorzystaniem specjalistycznego sprzętu i metod rejestracji pozwoliła określić warunki wystąpienia degradacji i ich ewentualnej predykcji w oparciu o dobrze

przygotowany program badań doświadczalnych i numerycznych. Po analizie stanu zagadnienia sformułowano następującą tezę ogólną: *Możliwe jest wyznaczenie procesów degradacji termicznej wytwarzania przyrostowego CFRP przy użyciu kombinacji danych doświadczalnych i numerycznych pracy.*

Natomiast wskazanym **celem pracy** doktorskiej jest scharakteryzowanie strukturalnych, termicznych i właściwości mechaniczne kompozytów CFRP wytwarzanych z wykorzystaniem zmodyfikowaną metodą FDM po poddaniu obróbce w różnych warunkach termicznych. Przedstawiono w pracy porównanie wyników uzyskanych w symulacji numerycznej do badania wyników badań eksperymentalnych dotyczących tego samego przypadku.

Teza sformułowana jest bardzo ogólnie choć możliwe byłoby przedstawienie jej bardziej szczegółowo np. uwzględniając rodzaj danych doświadczalnych i numerycznych i odniesienie ich do charakterystycznych cech materiału CFRP wytwarzanego przyrostowo.. Niemniej jednak **to cel i zakres pracy są tu najistotniejsze w ocenie przedstawionych w niej wyników i analiz**

W dysertacji Doktorantka przedstawiła oryginalne podejście do istniejących opisów zjawisk dotyczących wytwarzania kompozytów CFRP techniką 3D. Rezultaty badań przedstawionych przez Autorkę dotyczą głównego osiągnięcia z tym związanego tj. opracowania zintegrowanego systemu do badania kompozytów CFRP przy użyciu zarówno metod eksperymentalnych, jak i numerycznych i wykazanie związku pomiędzy obciążeniem cieplnym kompozytu CFRP a degradacją termiczną.

W podsumowaniu analizy treści i oceny pracy należy stwierdzić, że osiągnięty został główny cel główny pracy polegający na zbadaniu efektów różnych procesów obróbki termicznej właściwości mechanicznych, stabilności termicznej i charakterystyk morfologicznych kompozytów z polimerów wzmacnianych włóknem węglowym (CFRP) wytwarzanych przy użyciu zmodyfikowanej drukarki FDM.

Należy też pokreślić pełne uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej oraz zaproponowanego programu zrealizowanych badań w zakresie eksperymentu i teoretycznego modelowania, biorąc pod uwagę istniejące braki w literaturze przedmiotu oraz ewidentną potrzebę rozwoju badań w tym obszarze z uwagi na pożądane perspektywiczne wykorzystanie wyników w przygotowaniu przyszłych rozwiązań technicznych aplikacyjnych (elementy urządzeń / konstrukcji) eksploatowanych w specyficznych warunkach zagrażających możliwą degradacją, w szczególności degradacją termiczną.

II. Ocena merytoryczna rozprawy

a) Uwagi ogólne

Poszukiwanie i modelowanie mechanicznego zachowania różnych materiałów inżynierskich o cechach wymaganych do szczególnych zastosowań., w tym materiałów kompozytowych o szczególnych cechach (wysokie właściwości wytrzymałościowe, mała gęstość, wysoka wytrzymałość względna, odporność na korozję etc.) wymaga adekwatnego doboru składników materiału złożonego, sposobu jego wytworzenia oraz możliwości przewidywania efektów funkcjonowania dla projektowania tego rodzaju procesów oraz dla uniknięcia wystąpienia możliwych zjawisk negatywnych, w tym różnych form degradacji. Taki materiał stanowi np. kompozyt polimerowy wzmacniany włóknem węglowym CFRP.

Dysertacja przedstawia analizę stanu zagadnienia w oparciu o 105 różnych źródeł dobrze dobranych pozycji literaturowych krajowych i zagranicznych obejmujących najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie z uwzględnieniem pozycji już historycznych (najstarsza pozycja z 1950r. oraz osiągnięcia na przestrzeni ponad 20 ostatnich lat w tym najnowszych z 2023 r.

Dokonana szczegółowa analiza stanu wiedzy pozwoliła na zaproponowanie przez Doktorantkę głównej tezy tj. *„Możliwe jest wyznaczenie procesów degradacji termicznej wytwarzania przyrostowego CFRP przy użyciu kombinacji danych doświadczalnych i numerycznych pracy „* Autorka przedstawia dobrze sformułowane uzupełnienie ww. tezy ogólnej poprzez zrealizowanie celów :1) dokonanie charakterystyki warunków termicznych, morfologicznych i mechanicznych właściwości kompozytów CFRP wykonanych drukiem 3D z użyciem zmodyfikowanej drukarki FDM, 2) określenie zależności między parametrami obciążenia termicznego. (wielkość, czas ekspozycji) i zmianami strukturalnymi i mechanicznymi – (kruchosć osnowy i obniżona wytrzymałość na rozciąganie) wraz z dokonaniem analizy strukturalnej, mechanicznej i termicznej analizy kompozytów CFRP, pozwalającej na określenie wpływu ekspozycji termicznej i na porównanie degradacji termicznej w kompozytach CFRP wytworzonych na zmodyfikowanej drukarce FDM jako AM z konwencjonalną metodą wytwarzania.

Badania te mają na celu dostarczenie wiedzy na temat procesu degradacji termicznej w kompozytach CFRP wytworzonych z użyciem zmodyfikowanej drukarki FDM jako AM powinny wykazać efekty wynikające z porównania z konwencjonalną metodą wytwarzania. Przeprowadzona strukturalna, mechaniczna i termiczna analiza właściwości kompozytów CFRP pod wpływem ekspozycji termicznej daje możliwość porównania z uzyskanymi wynikami w symulacji numerycznej. Takie zweryfikowane podejście może posłużyć opracowaniu procedury modelowania zaawansowanych struktur kompozytowych z uwzględnieniem czynników wpływających na ewentualną degradację, w tym szczególnym przypadku termiczną. Badanie degradacji termicznej jest realizowane z wykorzystaniem danych doświadczalnych i numerycznych. Prace eksperymentalne obejmują proces wytwarzania przyrostowego metodą FDM, realizację badań właściwości mechanicznych w teście rozciągania, charakteryzację termiczną za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC), charakterystykę morfologiczną z wykorzystaniem metod badań nieniszczących (NDT) w tym spektroskopii terahercowej i skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

Prace badawcze numeryczne obejmują analizy numeryczne - kompleksowe symulacje z wykorzystaniem oprogramowania Abaqus, z wykorzystaniem modelowania metodą elementów skończonych (MES). Metodologia badania wpływu ekspozycji termicznej na integralność mechaniczną próbek kompozytowych CFRP wytwarzanych przyrostowo. Dodatkowo badania teoretyczne przeprowadzono z zastosowaniem klasycznej teorii laminacji (CLT), realizowanej poprzez niestandardowe skrypty języka Python, dla dokładnego wyjaśnienia zachowania i określenia wydajność wydrukowanych próbek w różnych warunkach termicznych. Zasadniczy efekt pracy stanowią:

- 1) wykazanie eksperymentalnie i numerycznie związku pomiędzy obciążeniem cieplnym kompozytu CFRP a degradacją termiczną
- 2) wykonanie kompleksowych badań eksperymentalnych i analitycznych, ujawniających wpływ długotrwałego nagrzewania i cyklicznej ekspozycji termicznej na znacznie pogorszenie mechanicznych właściwości użytkowych kompozytów CFRP (wykazanie zmniejszonej

wytrzymałości na rozciąganie, modułu Yunga a także zmiany właściwości termicznych, takie jak temperatura zeszklenia (T_g) i krystaliczność, które zostały dokładnie przeanalizowane za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowa (DSC) i innych metod.

3) wykazanie, że obróbka termiczna wpływa na integralność strukturalną i wydajność kompozytów CFRP. (badania z użyciem optycznej i skaningowej mikroskopii).

Kompozyty CFRP skojarzone z ewentualnym wystąpieniem efektów degradacji w szczególności termicznej oraz zjawisk temu towarzyszących w różnych warunkach niskiej i wysokiej temperatur, stałej i cyklicznie zmiennej stanowi bardzo ważne zagadnienie naukowo-badawcze wymagające adekwatnego sprzężenia wyników badań eksperymentalnych (pochodzących od odpowiednio dobranych rodzajów i metodyki badań) z opisem teoretycznym bazującym na wybranych metodach analitycznych i narzędziach numerycznych.

Dobór eksperymentalnych metod badawczych (w tym: SEM, DSC, testy rozciągania itd..) oraz możliwość na ich podstawie generowania założeń jak najbliższych rzeczywistości, pozwalających na adekwatne sformułowanie modelu matematycznego materiału, równań konstytutywnych etc...stanowią najlepsze możliwe podejście do ich określenia.

Pokazane wyniki z wybranych metod bardzo dobrze dokumentują osiągnięcia badawcze w tym zakresie i dają podstawę do kontynuacji badań zmierzających do doskonalenia efektu zgodności rzeczywistego zjawiska z efektem przewidywanym teoretycznie w wyniku modelowania.

Analiza wystąpienia zjawiska degradacji termicznej i jej skutków jest ważne nie tylko z poznawczego punktu widzenia, ale przede wszystkim daje podstawę działań zewnętrznych (rodzaje i parametry obciążeń), które mogłyby uniemożliwić ich wystąpienie. Z aplikacyjnego punktu widzenia to jest bezpieczeństwo funkcjonowania konstrukcji z danego materiału kompozytowego (tu CFRP) a pracujących w bardzo trudnych zmiennych warunkach (niska i wysoka temperatura, obciążenia stałe i cyklicznie zmienne). Cenna jest też nabyta uzupełniająca wiedza o charakterze zmian właściwości mechanicznych i strukturalnych materiału w tych specyficznych warunkach

Uważam też, że przedstawione wyniki nie tylko w tej dysertacji ale też w 6 najnowszych publikacjach zespołu Autorów z udziałem Doktorantki, 3 pracach konferencyjnych oraz monografii (wskazane w spisie publikacji własnych na początku pracy) jako efekt współpracy bardzo kompetentnego zespołu naukowców z wizją i doświadczeniem tak w zakresie eksperymentu jak i modelowania stanowią bardzo istotny wkład w rozwój wiedzy o funkcjonowaniu materiałów kompozytowych CFRP w różnych warunkach ze szczególnym uwzględnieniem problemu degradacji, w tym termicznej, ich strukturze wewnętrznej, morfologii i w konsekwencji obniżonych właściwościach mechanicznych

Należy też zwrócić uwagę na fakt, że Doktorantka zrealizowała program badań zawartych w dysertacji w ramach współpracy międzynarodowej pomiędzy Instytutem Maszyn Przepływowych IMP PAN w Gdańsku i Uniwersytecie Technicznym w Kownie, KTU na Litwie. Efektem owocnej współpracy jest wytwarzanie kompozytów CFRP oraz realizacja części programu badań eksperymentalnych tych materiałów w Kownie z wykorzystaniem metod badań nieniszczących (NDT) oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i mikroskopii optycznej. Pozostała część programu badań zrealizowano w IMP PAN w Gdańsku.

b) Uwagi szczegółowe

Należy zwrócić uwagę, że ułożenie programu badań oraz zastosowane metody badawcze świadczą o bardzo dobrej znajomości problemu naukowego przez Doktorantkę. Wobec ww. uwag ogólnych do przedstawionych wyników i ich interpretacji przez Autorkę nasuwają się następujące uwagi i pytania :

1. Praca napisana jest w języku angielskim, wyróżnia się staranną edycją, tak od strony tekstu jak i od strony graficznej. Występują tylko bardzo nieliczne błędy edycyjne nie mające wpływu na wysoką ocenę pracy. Jest też brak formalnie wymaganego streszczenia rozprawy doktorskiej w języku polskim.
2. Fotografie na rysunkach są zbyt małe i utrudniają dostrzeżenie szczegółów morfologicznych.(np. Fig.3.16). opisy na części rysunków/ wykresów są z bardzo małymi fontami i utrudniają odczytanie (np. Figs. 4.5, 4.6)
3. Mając na uwadze fakt drobiazgowego opisu tekstowego poszczególnych wyników badań i bieżącego odnoszenia interpretacji własnej kojarzonej z informacjami przedstawianymi w przywoływanych źródłach literaturowych należy docenić tak głęboką analizę wyników. Pozostaje jednak pewien niedosyt związany ze stosunkowo niewielką ilością prezentowanych wizualizacji badanych efektów i skutków degradacji choć można uznać że reprezentacja graficzna jest wystarczająca z punktu widzenia spójności z tekstem. Stąd moja sugestia wykorzystania tych niepublikowanych w pracy wyników w kolejnych przygotowywanych publikacjach.
4. Biorąc pod uwagę fakt, że istnieją różnice w strukturach materiałowych między elementami CFRP wytwarzanymi addytywnie w stosunku do wytwarzanych tradycyjnymi metodami i różnice te będą prowadzić do różnic w procesach degradacji, to celowym byłoby wykazanie tych różnic. Czy Doktorantka dysponuje takimi danymi i może je zaprezentować ?
5. Odnosząc się do informacji zamieszczonych w pracy, proszę przedstawić i wyjaśnić zasadnicze różnice w prezentowanych efektach degradacji termicznej i jej skutków, występujących zakresie temperatury najniższej i najwyższej , przy obciążeniu termicznym stałym i cyklicznym.
6. Specyficzne, stosunkowo trudne warunki realizacji badań, wymagają doboru metod i aparatury pozwalającej na identyfikację oczekiwanych efektów zjawiska degradacji i ich pomiar oraz rejestrację. Proszę uzasadnić dokonany dobór metod ze wskazaniem możliwości badawczych (rodzaje wyników), w tym dokładności wyników.
7. W pracy wskazano, że teoria Classical Laminate Theory CLT daje wyobrażenie o rozkładzie sił w laminacie, naprężeń i odkształceń w kompozycie CFRP. Określenie równań do rozwiązania kinematyki zależność między odkształceniem i naprężeniem na laminacie CFRP a wygenerowanym skryptem Pythona aby obliczyć macierz sztywności (Q), pozwala na określenie wartości odkształcenia sprężystego i naprężenia w każdej warstwie. Czy takie podejście klasyczne będzie użyteczne dla każdej innej geometrii struktury wewnętrznej kompozytu ?
8. W jaki sposób interpretuje Pani problem konstytuowania granicy rozdziału faz (włókno / osnowa) w badanych kompozytach AM CRFP ? Jak różne parametry druku FDM wpływają na efekt połączenia ?
9. Reakcja mechaniczna drukowanych próbek CFRP po obróbce termicznej i bez obróbki termicznej została zasymulowana za pomocą oprogramowania MES w mikroskali i w

skali makro. Wykazano, że wartości wytrzymałości i modułu z mikroskali dają mniej dokładne wartości niż symulacja w makroskali w porównaniu z wartościami doświadczalnymi po obciążeniu termicznym. Właściwości mechaniczne w obu mikroskali i w skali makro przeszacowują wynik eksperymentu. Zakłada się, że wady w próbkach CFRP wynikające z charakteru metody druku FDM wpływają na niższe wartości właściwości mechanicznych wykazane w eksperymencie. Czy zatem inaczej dobrane parametry technologii wytwarzania drukiem 3D mogą zminimalizować ilość wad kompozytu CFRP?

10. Czy i na ile dokonane analizy i procedury numeryczne dla problemu modelowania CFRP można wykorzystać dla innych aranżacji struktur kompozytowych?
11. Jakie ograniczenia wymiarowe elementów kompozytowych CFRP wytwarzanych drogą druku 3D może Pani wskazać i uzasadnić?

c) Uwagi o charakterze dyskusyjnym

1. Jak Pani ocenia możliwość wykorzystania opracowanej procedury badawczej zarówno w zakresie programu badań eksperymentalnych jak i numerycznych do realizacji badań z użyciem innych materiałów kompozytowych do stosowania w warunkach ekstremalnych temperaturowych (inne wybrane rodzaje kompozytów), biorąc pod uwagę różnice w ich cechach?
2. Wyniki pracy dostarczają cennych spostrzeżeń i praktycznych wskazówek dotyczących projektowania i produkcji wysokowydajnych materiałów kompozytowych, podkreślając kluczowe znaczenie zarządzania temperaturą podczas procesu wytwarzania i w warunkach aplikacji elementu CFRP. Czy możliwe jest na tym etapie sformułowanie bardziej szczegółowych wytycznych do projektowania CFRP?

Podsumowanie.

Przedstawione w dysertacji wyniki świadczą o dużej umiejętności pracy badawczej Doktorantki w zespole realizującym badania naukowe eksperymentalne i teoretyczne, w tym modelowanie w obszarze **inżynierii i materiałowej i mechanicznej**. Można jednak uznać **dominację inżynierii mechanicznej** w zakresie opisu zjawisk w wytwarzaniu i mechanice materiałów kompozytowych o różnej strukturze wewnętrznej i w różnych warunkach realizacji badań oraz eksploatacji.

Ponadto z uwagi na przedstawione poniżej argumenty uważam, że są **podstawy do wyróżnienia tej opiniowanej rozprawy**, która pokazuje **bardzo duże umiejętności Doktorantki** w zakresie **organizacji i prowadzenia badań eksperymentalnych osobiście i we współpracy w zespole**, jak również w dokonywaniu interpretacji wyników badań doświadczalnych oraz **teoretycznej analizy i matematycznego/numerycznego modelowania**. Daje to możliwość kompletnego, systematycznego podejścia do identyfikacji i wyjaśnienia procesu degradacji termicznej kompozytu CFRP.

Główne **osiągnięcia indywidualne** uwidocznione w pracy doktorskiej są następujące:

1. Opracowanie numerycznego modelu struktury CFRP w różnych warunkach obróbki termicznej. Model ten umożliwił przewidywanie i analizę wpływu na właściwości mechaniczne, ułatwiając zrozumienie mechanizmu degradacji termicznej i wyników wydajności w kompozytach CFRP.
2. Udział w budowie stanowisk pomiarowych na terenie IMP PAN w Gdańsku i KTU w Kownie do analiz wpływu obciążenia termicznego na konstrukcje z AM CFRP. Stoiska te były wyposażone w zaawansowane czujniki i systemy akwizycji danych, aby dokładnie rejestrować reakcje termiczne i zmiany wydajności mechanicznej.

3. Modyfikacja stanowiska badawczego do prób rozciągania w KTU do stosowania przy wytwarzaniu przyrostowym próbek CFRP. Modyfikacje te obejmowały wdrożenie opraw i uchwytów zaprojektowanych specjalnie z myślą o unikalnych właściwościach CFRP wytwarzanych przyrostowo, zapewniające wiarygodne i precyzyjne pomiary wytrzymałości na rozciąganie.
4. Kompleksowe analizy procesów degradacji termicznej w próbkach AM CFRP zostały przeprowadzone przy użyciu badań nieniszczących (NDT) i niszczących metod. Analizy te dostarczyły szczegółowych informacji na temat wpływu obróbki termicznej na integralność strukturalną, ujawniając krytyczne informacje o zmianach właściwości mechanicznych, zmianach morfologicznych, i początku mechanizmów uszkodzeń.
5. Zidentyfikowanie i określenie dominujących typów procesów degradacji, które zachodzą w próbkach AM CFRP po obciążeniach termicznych. Wykazano kluczowe ich znaczenie poprzez korelację obserwowanych parametrów mechanicznych i morfologicznych zmian w kompozycie CFRP zachodzących w zależności od warunków termicznych.

III. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. **mgr inż. Isyny Izzal Muna nt. "Degradation of Additively Manufactured Polymer Based Composites under Thermal Conditions"** prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną i stanowi ważny wkład w rozwój wiedzy w obszarze materiałów kompozytowych i technik ich wytwarzania, w tym addytywnych pozwalającej na efektywną propozycję wykorzystania jej wyników.

Należy uznać, że Doktorantka osiągnęła zamierzony cel wykazując się znajomością zagadnień z zakresu **inżynierii materiałowej i inżynierii mechanicznej** ze szczególnym uwzględnieniem problematyki i szczególnych zagadnień w zakresie m, in. kompozytów, nauki o materiałach, mechaniki materiałów, metod badań nieniszczących i niszczących, metod teoretycznego modelowania z wykorzystaniem rozwiązań analitycznych i numerycznych. Można też uznać dominację dyscypliny **inżynieria mechaniczna**. Doktorantka wykazała się bardzo dobrym opanowaniem nowoczesnej metodyki i technik badawczych, adekwatnie dobranych do analizowanej problematyki badawczej. Wykazała się też umiejętnością rozwiązywania postawionych zadań i pracy naukowej

Niniejsza rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z możliwością przyszłego wykorzystania wyników do zastosowania w sferze gospodarczej.

Biorąc pod uwagę przedstawione w opinii szczegółowe uzasadnienie, zgodnie z art. 191 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce wnioskuję o dopuszczenia mgr inż. Isyny Izzal Muna do publicznej obrony przed Radą Naukową Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku oraz z uwagi na przedstawione w opinii argumenty składam wniosek o jej wyróżnienie.

