Prof. dr hab. inż. Romana Ewa Śliwa
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Rzeszów, 28.10.2016r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Majerskiego
nt." Wpływ temperatury na charakter zniszczenia i wybrane właściwości laminatów metalowo-włóknistych"
przedstawionej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej

I. Zakres opiniowanej rozprawy

Laminaty metalowo-włókniste jako materiały kompozytowe stanowią jedną z najbardziej zaawansowanych grup materiałów inżynierskich stosowanych w różnych dziedzinach techniki.

Różne aplikacje techniczne z uwagi na charakter obciążenia danego elementu wymagają adekwatnego doboru materiału do jego wytworzenia oraz poprzez skonfigurowanie jego cech winny zagwarantować właściwą jego eksploatację. Wybór rodzaju zastosowanego materiału złożonego musi być dokonany dla spełnienia wymagań eksploatacyjnych danego wyrobu kompozytowego, zwłaszcza w odniesieniu do charakteru obciążenia mechanicznego oraz temperatury. Z uwagi na konieczność posiadania wiedzy o skutkach działań tych obciążeń dla zabezpieczenia bezpiecznego funkcjonowania elementów z materiałów kompozytowych w warunkach ich eksploatacji ważne jest zidentyfikowanie wartości granicznych : naprężeń jako skutku obciążenia mechanicznego i cieplnego laminatów metalowo-włóknistych- FML. Te szczególne warunki obciążeń mechanicznych i temperaturowych charakteryzujące loty statków powietrznych zwłaszcza poruszających się z dużymi prędkościami (np. naddźwiękowymi) wymuszają poszukiwanie zaawansowanych materiałów na elementy konstrukcji dla sprostania tym warunkom tj. odpowiedniej odporności na cykliczne zmiany obciążeń mechanicznych i temperatury.

Przemysł różnych branż : motoryzacyjnej, sportowej w szczególności jachtowej ale przede wszystkim lotniczej już stosuje, ale tez oczekuje na coraz bardziej nowoczesne materiały konstrukcyjne, do których należą kompozyty warstwowe jak laminaty metalowo-włókniste (FML) składające się z cienkich warstw blach metalu i warstw kompozytów polimerowych. Należą do nich Arall (z włóknami ar amidowymi), Glare (z włóknami szklanymi) i Caral (z włóknami węglowymi) i są przedmiotem szczególnego zainteresowania z uwagi na fakt że są lekkie, o dużej wytrzymałość w tym zmęczeniowej oraz są odporne na korozję. Kompozyty typu Glare są szczególnie atrakcyjne

w zastosowaniach na elementy konstrukcji lotniczych, ale należy jednak zwrócić uwagę, że nowe typy materiałów kompozytowych wymagają stale przeprowadzanych badań nad rozwiązywaniem różnych problemów technicznych, wprowadzania rozwiązań innowacyjnych oraz badań nad ich rozwojem. Istotnym problemem jest określenie wpływu temperatury na efekt finalny różnych obciążeń elementów z materiału kompozytowego, w tym typu FML, które mogą prowadzić do zniszczenia. Określenie charakteru tego zniszczenia i określenie wpływu temperatury na zmianę właściwości laminatów metalowo-włóknistych może przyczynić się do bardziej skutecznych rozwiązań technologii wytwarzania kompozytów warstwowych typu FML i zapewnienia pożądanych cech z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania w trudnych warunkach eksploatacji obiektów latających np. duże wahania temperatur od ujemnych rzędu - - 60 st. C do dodatnich rzędu + 80 st..C a w badaniach laboratoryjnych do + 200 st. C a incydentalnie nawet wyższych oraz zmiennych, cyklicznych obciążeń mechanicznych powodujących zmęczenie materiału i w krytycznych warunkach zniszczenie.

Postęp techniczny w obszarze technologii wytwarzania materiałów kompozytowych o różnej strukturze, przeznaczonych do różnych zastosowań jest coraz większy i wiąże się ze wzrostem wymagań w stosunku do cech wyrobów uzyskiwanych w tych procesach ocenianych zarówno wg. osiąganych finalnych właściwości, ich struktury wewnętrznej jak i technik łączenia faz - składników kompozytu. Wszystkie te zagadnienia mają wpływ na trwałość, właściwości użytkowe i bezpieczeństwo eksploatacji zwłaszcza statków powietrznych. Te ww. zmienne w szerokim zakresie warunki obciążenia mechanicznego a zwłaszcza różne warunki temperaturowe wymagają szczegółowej analizy procesów fizyko-chemicznych zachodzących w strukturze laminatów metalowo-włóknistych. Pozwoli ona ocenić wpływ temperatury na właściwości i charakter ewentualnego zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych. Wiedza ta może pozwolić na wskazanie możliwości unikania efektów tych niekorzystnych zjawisk drogą uzyskania odpowiedniej odporności laminatów metalowo-włóknistych na ekstremalne warunki temperaturowe poprzez adekwatny dobór rodzaju komponentów, ich udziału i aranżacji w materiale złożonym.

Cechy szczególne składników FML jako materiału złożonego z fazy metalicznej i kompozytu polimerowego, w tym zróżnicowane właściwości mechaniczne, chemiczne i cieplne składników (w tym bardzo zróżnicowane wartości współczynników rozszerzalności cieplnej), ich udział objętościowy i aranżacja determinują cechy finalne FML i podatność na ewentualne zniszczenie, zwłaszcza w strefie połączenia metal-kompozyt. Wpływ czynników środowiskowych na właściwości mechaniczne tradycyjnych inżynierskich materiałów konstrukcyjnych jak materiały metaliczne, ceramiczne czy polimerowe oraz w ostatnich latach

kompozyty są przedmiotem badan prezentowanych w literaturze światowej i są uwzględnione w procesach certyfikacji materiałów lotniczych. Natomiast opracowywane nowe materiały , w tym o bardziej złożonej budowie, takich jak laminaty metalowo-włókniste, są przedmiotem stale rozwijających się kierunków badań i wymagają uzupełniania stanu wiedzy.
Stosowanie laminatów Glare jako materiału na elementy konstrukcji lotniczych wiąże się nie tylko z technologią ich wytwarzania, ale tez z formowaniem kształtowym. Odpowiednie przygotowanie powierzchni blachy, jej obróbka ma służyć uzyskaniu trwałego połączenia komponentów, ponieważ granica rozdziału łącząca blachę aluminiową i warstwy epoksydowo-szklane decyduje o efektywności przenoszeniu obciążeń przez konstrukcję. Należy też podkreślić, że pojawiające się problemy technologiczne wynikają m.in. z niedostatecznie poznanych mechanizmów procesów i zjawisk towarzyszących zarówno procesom wytwarzania danego typu kompozytu jak i przygotowania składników kompozytu do połączenia.

Dokładne określenie właściwości mechanicznych oraz mechanizmów zniszczenia zarówno komponentów jak i laminatu jako całości uzasadnia celowość podjęcia badań nad wpływem zmian temperatury na strukturę i właściwości laminatów FML prezentowanych w ramach opiniowanej rozprawy.

Struktura pracy obejmuje : wprowadzenie , charakterystykę laminatów FML z zarysem właściwości i wytwarzaniem, przedstawieniem problematyki procesów zniszczenia analizą przyczyn powstawania uszkodzeń , przedstawieniem typowych mechanizmów oraz form zniszczenia, analizę wpływu temperatury na właściwości laminatów FML z uwzględnieniem rozszerzalności cieplnej oraz wpływu zmian temperatury na właściwości mechaniczne, uzasadnienie podjęcia tematu, cele i tezy pracy, program badań z charakterystyka materiału i metodyki, wyniki badań wraz z analizą wytrzymałości na rozciąganie, badania cieplno-mechaniczne, badania odporności na ekspozycję wysokotemperaturową – próba ścinania oraz podsumowanie i wnioski końcowe i literaturę.

Zakres merytoryczny prezentowanych w pracy badań zawiera: badania statycznej wytrzymałości na rozciąganie, badania termomechaniczne metodą DMA, badania w próbie ścinania połączeń zakładkowych sezonowanych w podwyższonej temperaturze oraz analizę zniszczenia materiału badawczego po wykonaniu badań mechanicznych w oparciu o obserwacje makro i mikroskopowe.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały charakter zależności pomiędzy temperaturą, właściwościami i rodzajem zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych. Wykazano

występowanie czynników krytycznych warunkujących właściwości oraz odporność badanych laminatów w szerokim zakresie temperatury odpowiadającym temperaturom eksploatacji kompozytowych części lotniczych (w pracy określane jako badania w obniżonej i podwyższonej temperaturze). Zidentyfikowano czynniki krytyczne i opracowano tabelaryczne zestawienie właściwości oraz głównych form degradacji, co wg. Autora umożliwia przewidywanie właściwości oraz zwiększanie odporności laminatów metalowo-włóknistych na różne warunki temperaturowe.

W wielu publikacjach wskazuje się na różne czynniki wpływające na efekt finalny wytworzenia materiału kompozytowego (różne, zależnie od technologii wytwarzania) , w tym roli warstw fazy metalicznej w kompozycie GLARE w kształtowaniu właściwości całego laminatu. Laminaty metalowo-włókniste mają większą wytrzymałość niż materiał mono-metaliczny, warunkowaną wytworzeniem efektywnego, trwałego połączenia pomiędzy tymi składnikami.

Badania zjawisk w zakresie analizy wpływu obciążenia mechanicznego i termicznego – m.in. na efekt zniszczenia i poprzez to na właściwości całego laminatu mogą przyczynić się nie tylko do poszerzenia wiedzy w tym zakresie ale przede wszystkim mogą dać przyczynek do udoskonalenia technologii wytwarzania tego typu materiałów kompozytowych. Adekwatny dobór żywicy i odpowiednie przygotowanie powierzchni blachy (w rozprawie stosowane : stop aluminium 2024 i tytan Grade 2) gwarantuje adhezyjne połączenie i zwiększoną wytrzymałość. Stąd realizacja badań efektów wpływu temperatury (zwłaszcza w zakresie spodziewanych zakresów temperatury eksploatacji) na występowanie ewentualnego zniszczenia z odniesieniem do poszczególnych faz w strukturze kompozytu typu Glare i w odniesieniu do kształtowania właściwości laminatu, stanowi uzasadnienie realizacji niniejszej pracy doktorskiej.

Fizyka zjawisk wpływających na proces zniszczenia jest przedmiotem toczących się badań , których wyniki wskazują na różne interpretacje i wykorzystanie różnych teorii co wymaga intensywnych badań zwłaszcza, że dotyczą one coraz to nowszych wariantów materiałów kompozytowych. W praktyce przemysłowej, w zastosowaniach technicznych poszukuje się stale sposobów coraz bardziej efektywnych i zarazem ekonomicznych rozwiązań przy utrzymaniu pożądanej wysokiej jakości wyrobów kompozytowych. Z tego tytułu zapowiadane w pracy wykorzystanie opracowanych wyników do przewidywania właściwości laminatów w oparciu o wykorzystanie danych z badań komponentów laminatów oraz współczynnika MVF w różnych temperaturach stanowią dobre uzasadnienie podjętych przez Doktoranta badań.

Postawione cele : 1) dokonanie analizy procesów fizyko-chemicznych zachodzących w strukturze laminatów metalowo-włóknistych w warunkach różnych wartości temperatury, mających wpływ na właściwości i charakter zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych

oraz 2) ocena możliwości kształtowania odporności na ekstremalne warunki temperaturowe nowoczesnych laminatów metalowo-włóknistych, poprzez dobór komponentów i ich konfiguracji można uznać za dobrze sformułowane.

Struktura pracy obejmuje analizę stanu wiedzy w zakresie przedstawianej problematyki, na podstawie której zaproponowano tezę pracy, dla udowodnienia której przedstawiono program badań, z odpowiednią metodyką, oraz wyniki, których analiza pozwoliła na wyciągniecie wniosków końcowych.

Zakres badań w prezentowanej rozprawie obejmował: wytwarzanie wybranych 4 konfiguracji FML, badania statyczne wytrzymałości na rozciąganie, badania termomechaniczne metodą DMA, badania połączeń zakładkowych sezonowanych w podwyższonej temperaturze oraz analizę zniszczenia materiału badawczego po wykonaniu badań mechanicznych w oparciu o obserwacje makro i mikroskopowe.

Za osiągnięcie pracy można uznać możliwe wykorzystanie jej wyników do bardziej precyzyjnego opisu efektów mechanizmu zniszczenia FML w różnych warunkach obciążenia, opracowanie zestawienia właściwości oraz kluczowych form degradacji umożliwiających przewidywanie właściwości oraz zwiększenie odporności laminatów metalowo- włóknistych na różne warunki temperaturowe oraz zidentyfikowanie czynników krytycznych na bazie analizy procesów fizyko-chemicznych, mechanizmów degradacji i obserwacji właściwości laminatów FML oraz do bardziej efektywnego projektowania technologii wytwarzania kompozytów warstwowych typu FML i ich implementacji w warunkach rzeczywistego procesu przemysłowego.

II. Ocena merytoryczna rozprawy

a) Uwagi ogólne

Poszukiwanie i projektowanie nowych materiałów kompozytowych o cechach wymaganych do szczególnych zastosowań jak np. w lotnictwie determinują adekwatny dobór komponentów materiału złożonego o pożądanych cechach, warunków przygotowania powierzchni do ich połączenia dobór najkorzystniejszych parametrów realizacji procesu łączenia w powiązaniu ze skutkami zmian w strukturze kompozytu i wynikającymi z niej właściwościami – cechami finalnymi. W opiniowanej pracy przedstawiono wyniki analizy literatury dotyczącej aktualnych problemów badawczych związanych z uzyskaniem żądanych właściwości materiału kompozytowego typu GLARE pod katem oceny wpływu temperatury na właściwości kompozytu i ich powiązanie z efektem zniszczenia tego typu materiału

hybrydowego w warunkach realizowanych testów wytrzymałościowych tj. statycznego rozciągania i ścinania.

W pracy przedstawiono analizę stanu zagadnienia w oparciu o **62** dobrze dobranych pozycji literaturowych krajowych i zagranicznych obejmujących najnowsze osiągnięcia w tej dziedzinie z uwzględnieniem pozycji już historycznych oraz z ostatnich lat, w tym najnowszej z 2015r.

Szkoda jednak, że Doktorant nie uwzględnia w analizie stanu wiedzy na podstawie przeglądu literatury dorobku zespołu z Politechniki Lubelskiej pod kierownictwem prof. Barbary Surowskiej, nawet tych publikacji czy referatów konferencyjnych, których jest współautorem. Powstał znaczny dorobek m.in. w ramach realizacji projektu kluczowego pn. Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym,, w ramach którego realizowana była również ta praca doktorska. Oto tylko niektóre z nich :

- Jakubczak P., Bieniaś J., Majerski K., Ostapiuk M., Surowska B. ***The impact behavior of aluminum hybrid laminates*** Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, nr 4, vol. 86, s. 287-294
- Bieniaś J., Jakubczak P., Surowska B., ***Problematyka obciążeń dynamicznych o niskiej energii laminatów typu GLARE*** Composites Theory and Practice, 13:3 (2013) 165-169.
- Bieniaś J., Jakubczak P., Majerski K., Ostapiuk M., Surowska B, ***Methods of ultrasonic testing, as an effective way of estimating durability and diagnosing operational capability of composite laminates used in aerospace industry*** Eksploatacja i Niezawodność, Vol. 15., Nr 3, 2013, str. 284-289
- Bieniaś J., Ostapiuk M., Surowska B. ***Fraktografia i analiza zniszczenia kompozytów węglowo/epoksydowych poddanych obciążeniom statycznym i dynamicznym w podwyższonych temperaturach*** Acta Mechanica et Automatica 6(1) (2012), str. 17-20
- Majerski K., Surowska B., Bieniaś J. ***Tensile properties of carbon fiber/epoxy laminates at low and room temperatures*** Composites Theory and Practice, 12:3 (2012) 182-185
- Ostapiuk M., Bieniaś J., Jakubczak P., Surowska B. ***Identyfikacja nieciągłości w kompozytowych panelach sandwiczowych z wykorzystaniem mikrotomografii komputerowej*** Przetwórstwo Tworzyw, 2 (146), 2012, 93-97.
- Majerski K., Bieniaś J., Ostapiuk M. ***Identyfikacja porowatości w kompozytach węglowo i szklano/epoksydowych metodą mikrotomografii komputerowej*** Przetwórstwo Tworzyw, 2(146), 2012, 98-102
- Jakubczak P., Bieniaś J., Dragan K ***Odporność kompozytów epoksydowo-węglowych na uderzenia udarowe przy niskich prędkościach*** Przetwórstwo Tworzyw, 3 (147), 2012, 205-209
- M.Ostapiuk, B.Surowska, J. Bieniaś, K. Majerski ***Failure analysis of Fiber Metal Laminates after bending strength test;*** ICCS 18 18th International Conference on Composite Structures, Lisbon, 14-19.June 2015 r.
- Surowska B., Ostapiuk M., Bieniaś J., Majerski K. ***FEM simulation of bending aspect in FibreMetal Laminate***; ICCS 18 18th International Conference on Composite Structures, Lisbon, 14-19.June 2015
- Bieniaś J., Jakubczak P., Surowska B., Dragan K ***Odporność na uderzenia dynamiczne o niskiej energii i charakterystyka zniszczenia laminatów typu aluminium/włókno węglowe***; XVIII Sympozjum Kompozyty- teoria i praktyka (Composites - Theory and Practice). Poraj, I 2014,
- Surowska B., Majerski K., Bieniaś J ***Wpływ czynników środowiskowych na właściwości mechaniczne laminatów metalowo-włóknistych***; XVIII Sympozjum Kompozyty- teoria i praktyka (Composites - Theory and Practice). Poraj, 2014,
- Surowska B., Majerski K., Bieniaś J., Kłosowski G ***Mechanical behaviour of hygrothermal conditioned fiber metal laminates***; ECCM16, Sewilla 2014,
-Bieniaś J., Jakubczak P., Surowska B., Dębski H. ***Experimental and numerical investigation of low-velocity impact behavior of selected fibre metal laminates***; ECCM16, Sewilla 2014,
- Ostapiuk M, Bieniaś J., Surowska B., Majerski K. ***Połączenie metalu z polimerem w laminatach typu FML***; XIV Konferencja Naukowo-Techniczna \"Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne" 2014, , Gliwice – Istebna,
- Majerski K. ***Mechanical response of hygrothermal conditioned fiber metal laminates***; 9th AIRTEC 2014 International Congress, 28-30 October 2014, Frankfurt, Germany
- ,Ostapiuk M., Bieniaś J., Surowska B., Jakubczak P., Majerski K. ***Analysis of aluminium surface layer in evaluating the strength properties of Fiber Metal Laminates***; 9th AIRTEC 2014, International Congress, 28-30 October 2014, Frankfurt, Germany,

- Surowska B., Jakubczak P., Bieniaś J. ***Identyfikacja mechanizmów zniszczenia w wybranych laminatach poddanych uderzeniom dynamicznym o niskiej prędkości;*** XVII Sympozjum „KOMPOZYTY 2013 - Teoria i praktyka" 2013 Poraj
- Bieniaś J., Majerski K., Surowska B., Jakubczak P. ***Wybrane właściwości mechaniczne oraz analiza zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych***; XVII Sympozjum „KOMPOZYTY 2013 Teoria i praktyka" 2013 Poraj
- Bieniaś J., Majerski K., Surowska B. ***Strength properties of fiber metal laminates in low temperature environment***; ICCSE17 , 2013, Porto
- Bienias J., Jakubczak P., Majerski K., Ostapiuk M., Surowska B ***Failure aspects of Fiber Metal Laminates after low velocity and low energy impact***; 19th International Conference of Composite Materials, 2013, Montreal Canada , Proceedings of ICCM19, pp. 294-295 ,
-- Surowska B., Bieniaś J., Majerski K., Ostapiuk M. **Corrosion *resistance of selected Fibre Metal Laminates - investigation of mechanical properties;*** *8-th International Conference "Supply on the Wings", 2013, Frankfurt*
- Majerski K., Surowska B., Bieniaś J. ***The influence of low temperatures on tensile behavior of Fiber-metal laminates;*** 8-th International Conference "Supply on the Wings", November 5th - 7th, 2013, Frankfurt
- Bieniaś J., Jakubczak P., Majerski K., Ostapiuk M. ***The mechanical properties and failure analysis of selected fibre metal laminates***; The XVII International Conference „Mechanics of Composite Materials" Riga, 2012,
-Bieniaś J., Jakubczak P., Surowska B. ***Impact behavior of fibre metal laminates;*** The XVII International Conference „Mechanics of Composite Materials" Riga,, 2012,
- Surowska B., Majerski K., Bieniaś J. ***Low temperature effect on mechanical properties of glass and carbon reinforced/epoxy composites and FML***; The XVII International Conference „Mechanics of Composite Materials" Riga, 2012,
- Surowska B., Dębski H., Bieniaś J. ***Fatigue of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy composites***; ECCM15 - 15TH European Conference on Composite Materials, Venice, Italy 2012,
- Ostapiuk M., Majerski K., Bieniaś J., Surowska B., Jakubczak P. ***Influence of fibers orientation on the type of failure in Fiber Metal Laminates***; 7 th Conference Supply of the Wings, November 2012, Frankfurt,
- Bieniaś J., Surowska B., Ostapiuk M., Majerski K. Jakubczak P. ***Complexity of Fiber Metal Laminates vs low velocity impact resistance***; 7 th Conference Supply of the Wings, November 2012, Frankfurt,
- Bieniaś J., Surowska B. ***The mechanical properties and failure analysis of selected FiberMetalLaminates;*** ECCM15 - 15TH European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 2012,
- Jakubczak P., Majerski K. ***Struktura i właściwości laminatów szklano/epoksydowych***; Sympozjum Inżynierowie Nowej Ery, Lublin 2011
- Bieniaś J., Jakubczak P. ***Badania wybranych właściwości wytrzymałościowych laminatów hybrydowych: tytan-kompozyt węglowo/epoksydowy***; XI Ogólnopolska Konferencja Tytan i jego stopy, Myczkowce , 2011.
-Majerski K., Bieniaś J., Ostapiuk M. ***Identyfikacja porowatości w kompozytach węglowo i szklano/epoksydowych metodą mikrotomografii komputerowej***; Międzynarodowa Konferencja Diagnostyka 2011, Male, Italia , 2011.

Te i inne prace zespołu stanowią istotny wkład do stanu wiedzy w obszarze różnych zagadnień dotyczących kompozytów, ze szczególnym uwzględnieniem aplikacji lotniczych. Stąd wnioski z analizy stanu zagadnienia dotyczące przeglądu literatury oraz przeprowadzonych badań wstępnych i części badań właściwych dotyczyły właśnie wyników prezentowanych w ww. publikacjach, co postawiono sformułować tezę, że:

Analiza właściwości i charakteru zniszczenia pozwala na identyfikację czynników krytycznych, warunkujących odporność laminatów FML na obniżoną i podwyższoną temperaturę.

Postawiona teza jest uprawniona, pod warunkiem jednak doprecyzowania w niej pojęć : *obniżona i podwyższona temperatur*a (i w stosunku do czego), ponieważ weryfikacja tej tezy jest trudna z uwagi na niekonkretne punkty odniesienia.

Istotne jest określanie związków pomiędzy strukturą, techniką wytwarzania a właściwościami kompozytu w tym adhezyjnymi, co wykazuje potrzebę analizy struktury warstw wierzchnich, oceny adhezji w odniesieniu do problemów wytrzymałościowych.

Doktorant wskazał, ww. **2** ***cele*** **pracy** : naukowy i praktyczny. Postawione cele badań znajdują swoje uzasadnienie w programie badań w warunkach laboratoryjnych, ale dających podstawę do ewentualnego przyszłego zaimplementowania w warunkach przemysłowych.

Program badań eksperymentalnych podzielono na zasadnicze etapy:

A. Opracowanie technologii i wytworzenie 4 rodzajów kompozytów warstwowych :
   1. *aluminium/kompozyt epoksydowo-szklany (AlG) złożony z blach ze stopu aluminium gat. 2024 ,*
   2. *aluminium/kompozyt epoksydowo-węglowy (AlC) na bazie stopu aluminium EN AW-2024 oraz preimpregnowanej taśmy węglowej UD194*
   3. *tytan/kompozyt epoksydowo-szklany (TiG) na bazie blach z czystego technicznie tytanu Grade 2*
   4. *tytan/kompozyt epoksydowo-węglowy (TiC) na bazie blach z czystego technicznie tytanu Grade 2*

B. Ocena wpływu zmian temperatury na statyczne właściwości wytrzymałościowe badanych laminatów

C. Wyznaczenie przebiegu wybranych właściwości fizyko-chemicznych w zakresie temperaturowym od 93K do 473K, w oparciu o dynamiczną analizę mechaniczną (DMA).

D. Identyfikacja zmian struktury i wytrzymałości połączenia adhezyjnego po długotrwałym wygrzewaniu w temperaturze 423K.

E. Analiza wpływu przedstawionych czynników środowiskowych na charakter zniszczenia badanych laminatów.

Szkoda jednak, że nie przeprowadzono nawet w bardzo ograniczonym zakresie badań wytrzymałości przy obciążeniach zmiennych, (badania wytrzymałości zmęczeniowej) jako testu charakterystycznych obciążeń konstrukcji lotniczych. Wobec braku takich prób, wyniki prób statycznych mogą być traktowane jedynie jako wstępny test dla wskazywanych aplikacji lotniczych.

Dobrze udokumentowane wyniki badań i zinterpretowane w oparciu o dobrze opisany stan wiedzy stanowią wypełnienie postawionych celów pracy, choć odstępstwa od rzeczywistych warunków obciążenia niewątpliwie w jakimś stopniu wpływają na ocenę finalnego efektu wpływu cech materiału hybrydowego FML na efekt połączenia składników i wytrzymałości FML oraz charakter zniszczenia w wyniku realizowanych testów wytrzymałościowych. Przedstawione wyniki mogą być wykorzystane przy modyfikacji procesów wytwarzania kompozytów typu GLARE .

Ułożenie programu badań oraz zastosowane metody badawcze świadczą o znajomości problemu naukowego przez Autora. Wobec ww. uwag ogólnych do przedstawionych wyników i ich interpretacji przez Doktoranta nasuwają się następujące kwestie i pytania :

1. Proszę przedstawić na przykładzie : jak osiągnięty został cel praktyczny wskazany jako *ocena możliwości kształtowania odporności na ekstremalne warunki temperaturowe*

nowoczesnych laminatów metalowo-włóknistych, poprzez dobór komponentów i ich konfiguracji ,

2. Jak odnieść uzyskane wyniki badań realizowanych w warunkach obciążeń statycznych do aplikacji lotniczych, które wymagają badań przy obciążeniach nie tylko statycznych, ale też zmiennych ?

3. Proszę doprecyzować postawiony wniosek ogólny cyt.: *Możliwe jest przewidywanie wybranych właściwości laminatów w oparciu o wykorzystanie danych z badań komponentów laminatów oraz współczynnika MVF w różnych temperaturach.* O jakie wybrane konkretnie właściwości chodzi i na czym polega ich przewidywanie ?

4. Jak określa Doktorant nośność struktury kompozytowej (wniosek na str. 102) ?

5. Proszę wytłumaczyć występujące różnice w tekście pracy:

   Str. 61 ; badania prowadzone w temperaturze 153, 223, oraz 358 K

   Str. 43 : temperatury badan w zakresie -180 do + 200 st. C (etapy pracy)

   Str.. 47: badania wytrzymałości na rozciąganie laminatów w temperaturach: 153K, 223 K, 293 K oraz 385 K

   Str.52.: wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga - E oraz wydłużenie przy zerwaniu – ε w temperaturach 153, 223, 293 oraz 358 K.

   Str.54 .: próby statyczne w temperaturach 153, 293 oraz 358 K.

6. W jaki sposób wyniki z próby statycznego rozciągania wskazują na występowanie zależności wartości poszczególnych parametrów wytrzymałościowych składników oraz układu laminatów względem temperatury badania ?

7. Proszę wskazać i uzasadnić najbardziej korzystną charakterystykę dla określenia właściwości dynamicznych laminatów w zależności od temperatury (moduł zespolony, współczynnik stratności mechanicznej Tan Delta)

8. Jakie warunki musi spełnić FML by cechował się dużą nośnością ?

Praca zawiera bardzo wiele różnych wyników z 5 etapów realizowanych prac (ww. etapy A, B, C, D, E) . Wyniki badań zaprezentowano z ich bieżącą analizą . W odniesieniu do wniosków końcowych należy zwrócić uwagę na fakt, że są one dość ogólne nawet w części nazwanej wnioski szczegółowe, tzn. możnaby oczekiwać konkretnych wartości wyników odnoszących się do badanych 4 rodzajów kompozytów warstwowych o określonych parametrach struktury i właściwościach. Zasadniczym elementem podsumowania i wniosków są też tabele nr 6 i 7, które lepiej byłoby umieścić w podsumowaniu analizy wyników, bo dane w nich zawarte wymagają stosownej interpretacji

a tak wnioski końcowe są bardzo rozbudowane i rozmyte jest wskazanie zasadniczej odpowiedzi na problem zawarty w temacie pracy oraz w postawionej tezie. Należy docenić zebrane informacje wynikające ze zrealizowanych badań a zawarte w tabeli 6 (*Właściwości oraz kluczowe mechanizmy degradacji badanych laminatów FML w różnych warunkach temperaturowych)* i 7 (*Najważniejsze zidentyfikowane czynniki krytyczne*), które wynikają w części z wyników badań Doktoranta a w części z powiązania z danymi literaturowymi, porządkują dokonaną analizę wyników i mogą być podstawą dalszych badań użytecznych dla projektowania nowych materiałów.

b) **Uwagi szczegółowe**

- Czytelne przedstawienie zagadnienia badawczego zarówno od strony sformułowanych treści merytorycznych jak i zasadniczej formy rozprawy,
- Praca ujmuje bardzo dużo różnego rodzaju wyników, które są ważne dla kompletności dokonywanych analiz, ale część z nich potraktowana jest w opisie dość skrótowo. Celowym byłoby wykorzystanie pełnych wyników w późniejszych publikacjach i jako podstawa do dalszych badań,
- Przedstawione wizualizacje wyników dobrze odzwierciedlają analizowane współzależności między parametrami i procesu materiału (wykresy), ale niestety nie wszystkie szczegóły na fotografiach są widoczne a opisy wystarczająco czytelne. Szkoda ze fotografie są takie małe, ze trudno jest zidentyfikować istotne dla analizy zmiany w wyniku zniszczenia próbek kompozytowych w testach rozciągania czy ścinania. Brak tez jest informacji o wielkości powiększenia obrazu a wydruki opisu obrazu z mikroskopu są nieczytelne. Nie ma też zaznaczenia z których fragmentów jest powiększenie, co nie zawsze możliwe jest do zidentyfikowania. Niektóre zdjęcia są zbyt małe by można zweryfikować zawarte opisy i interpretacje w tekście. Przykładowo na rys. 31 (str. 62) brak jest wskazania obszaru powiększenia - celowe byłoby określenie lokalizacji pokazywanych fragmentów próbki .
- Edycja pracy jest przejrzysta, ale Doktorant nie ustrzegł się błędów edytorskich i nieścisłości terminologicznych oraz skrótów myślowych, których przykłady podaję poniżej :

<u>Nieścisłości terminologiczne / skróty myślowe/ niewłaściwe określenia</u> np.::

- str. 44 winno być : blachy ze stopu aluminium a nie blachy z aluminium,
- zamiast morfologia zniszczenia winno być morfologia obszaru zniszczenia
- str.47 zamiast statycznych właściwości winno być właściwości wytrzymałościowe z próby statycznego rozciągania
- brak konsekwencji w używaniu jednostek i skali : temperatura określana w części pracy w K a

w części w st. C (np. rys. 43 – 48)

- błędy w opisach na rys. 23 – 28 zamiast *eksperylne* winno być *eksperymentalne*
- brak podpisów dotyczących fragmentów rysunku np.:_a), b), c) czy d) przy obrazach / segmentach danego rysunku i/lub precyzyjnych podpisów pod rysunkami odnośnie tych podpunktów :

Numery rysunków kolejno:. 32 brak (a, b, c, d, e, f) , 34 brak (a, b, c, d), 36 brak (a, b, c, d) , 38 brak (a, b, c, d), 40 brak (a, b, c, d), 42 brak (a, b) , 61 brak (a, b, c, d, e, f), 62 brak (a, b, c, d) , 63 brak (a, b, c, d) , 64 brak (a, b, c, d, e, f) , 65 brak (a, b, c, d), 66 brak (a, b, c, d), 67 brak (a, b), 68 brak (a, b) , 69 brak (a, b), 70 brak (a, b), 71 brak (a, b), 72 brak (a, b).

c) **Uwagi o charakterze dyskusyjnym**

- Jakie cechy morfologiczne obszaru zniszczenia zasadniczo decydują o wnioskowaniu o właściwościach kompozytu FML ?
- Jak Doktorant rozumie pojęcie granicy plastyczności laminatu kompozyt włóknisty – blacha metalowa w odniesieniu do definicji granicy plastyczności materiałów metalicznych ?
- Mając na uwadze wycofywanie z produkcji środków zawierających chrom sześciowartościowy z uwagi na środowisko. jak sprawdzono i udokumentowano oddziaływanie na środowisko kwasu siarkowego oraz innych proponowanych związków w procesach przygotowania powierzchni blach do procesu łączenia warstw FML ?

W podsumowaniu należy zwrócić uwagę na pracochłonność w realizacji przedstawionego programu badań, wielość uzyskanych wyników wymagających skonfrontowania ze stanem wiedzy i poczynienia adekwatnych uzupełnień, ale też na potrzebę skorygowania wskazanych niedociągnięć pracy przy przygotowywaniu przyszłych publikacji czy opracowań z wykorzystaniem prezentowanych w pracy wyników. Wykazane ww. niedociągnięcia nie wpływają na zasadniczą pozytywną jej ocenę.

III. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Majerskiego stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy pozwalającej na efektywną poprawę projektowania kompozytów typu FML o specjalnych cechach użytkowych, ze szczególnym uwzględnieniem laminatów: stop aluminium – kompozyt epoksydowo-szklany, stop aluminium – kompozyt epoksydowo - węglowy, tytan - kompozyt epoksydowo-szklany oraz tytan – kompozyt epoksydowo - węglowy w szczególności w zakresie analizy procesów ich wytwarzania, współzależności w zakresie mechanicznego i

termicznego obciążenia elementów z kompozytów warstwowych FML. Można uznać, że Autor osiągnął zamierzony cel wykazując się znajomością zagadnień inżynierii materiałowej ze szczególnym uwzględnieniem problematyki kompozytów, zagadnień technologicznych oraz nowoczesnej metodyki i technik badawczych, adekwatnie dobranych do analizowanej problematyki badawczej. Wykazał się umiejętnością rozwiązywania postawionych zadań i pracy naukowej. Rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w myśl aktualnej Ustawy Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Autora pracy do publicznej obrony.