



**Prof. dr hab. inż. Gabriel Wróbel**

Katedra Mechaniki Technicznej i Stosowanej

ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

Politechnika Śląska



Gliwice, 03.09.2024

## *RECENZJA*

### ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pani mgr inż. Martyny Roszowskiej-Jarosz

pt. WPLYW MODYFIKACJI OSNOWY NA WYBRANE  
WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE POLIMEROWYCH  
KOMPOZYTÓW WARSTWOWYCH PRZEZNACZONYCH  
DO BUDOWY ELEMENTÓW BEZZAŁOGOWYCH  
STATKÓW POWIETRZNYCH.

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem  
Promotora: dra hab. inż. Marcina Kostrzewy  
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych,  
w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna  
Recenzja sporządzona na zlecenie

JM Rektora Uniwersytetu Radomskiego, prof. dra hab. Sławomira Bukowskiego  
z dnia 2024.07.08

## 1. Przedmiot pracy

Recenzowana praca jest pracą naukowo-badawczą. Obszarem badań obejmuje kompozyty warstwowe, których istotną właściwością jest chłonność energii uderzenia. Wybór poddanych badaniom kompozytów podyktowany został ich przeznaczeniem do budowy nośnych elementów bezzałogowych statków powietrznych, w skrócie BSP. Waler naukowości wynika z postawionego celu pracy, jakim jest zaprojektowanie i wytworzenie laminowanego materiału dedykowanego na powłokowe elementy BSP, opracowanie metodyki badań charakterystyk użytkowych wytworzonych w skali laboratoryjnej próbek laminatów, wyznaczenie wybranych charakterystyk oraz ocena badanych materiałów w układzie przyjętych kryteriów jakości. Literalnie, Doktorantka cel pracy zapisała w postaci ciągu celów cząstkowych:

1. Dokonanie przeglądu literaturowego rodzajów, właściwości i wymogów stawianych materiałom obecnie stosowanych w produkcji elementów BSP;
2. Innowacyjne wprowadzenie układu grafted-IPN jako modyfikacja żywicy epoksydowej do zastosowań w kompozytach warstwowych;
3. Dobór komponentów materiałowych i metody wytwarzania polimerowego kompozytu warstwowego;
4. Dobór normowych i nienormatywnych metod badań materiałów warstwowych do oceny ich właściwości mechanicznych;
5. Analiza ilościowego i jakościowego wpływu komponentów, na wybrane właściwości mechaniczne polimerowych kompozytów warstwowych składających się z warstw spienionego polichloru winylu (PVC), ze wzmocnieniem z tkaniny aramidowej połączonych lepiszczem międzywarstwowym z żywicy epoksydowej zmodyfikowanej poliuretanem (PU);
6. Innowacyjne zastosowanie analizy profilometrycznej do obrazowania zniszczeń po badaniu odporności na przebicie;
7. Opracowanie planu badań doświadczalnych do oceny wpływu lepiszcza międzywarstwowego na właściwości mechaniczne otrzymanych kompozytów.

Dla osiągnięcia celu przyjęła metodę właściwą pracom z dziedzin inżynierii mechanicznej i materiałowej, wykonując zmierzające do osiągnięcia postawionych celów badania eksperymentalne, których opracowane wyniki przyjęła za podstawę sformułowanych wniosków.

Praca liczy 189 str., zawiera 9 rozdziałów, poprzedzonych Spisem treści, Wykazem skrótów oraz Wprowadzeniem. Kończy się Wnioskami końcowymi, liczącym 299 poz. spisem literatury, spisami zawartych w pracy tabel, rysunków oraz wykresów.

## 2. Analiza treści rozprawy

*Rozdział wstępny* zawiera prezentację zawartości zasadniczych rozdziałów pracy.

We *Wprowadzeniu* autorka przedstawiła rys historyczny problematyki materiałów kompozytowych, podstawowe pojęcia stosowane w opisie materiałów tej klasy, klasyfikację materiałową i strukturalną kompozytów. Wskazała na celowość wykorzystania materiałów kompozytowych, w szczególności o budowie warstwowej. Objasniła pojęcia modyfikacji materiałów wielkocząsteczkowych. Omówiła charakterystyczne cechy strukturalne

modyfikowanych polimerów - rodzaje usieciowania. Przedstawiła właściwości fizyczne, chemiczne i wytrzymałościowe popularnych włókien wzmacniających konstrukcyjne elementy polimerowe. Wskazała miejsce, jakie wśród kompozytów zajmują tworzywa o charakterze przenikających się sieci polimerowych (IPN), co podyktowane było budową jednego z dwu wykorzystanych typów warstw badanych materiałów. Warstwy te to przesycone modyfikowaną poliuretanem żywicą epoksydową układy tkanin aramidowych o specyficznym splocie, które po utwardzeniu wykorzystane zostały na warstwy zewnętrzne – okładziny kompozytów warstwowych oraz międzywarstwy, według autorskiej koncepcji doktorantki. Drugą grupę warstw, ułożonych wewnątrz laminowanej powłoki, stanowiły warstwy pianek lotniczych, określane jako rdzeniowe. Taka struktura badanych kompozytów wynikała z przyjętego celu i programu pracy.

W rozdziale 2, zatytułowanym *Kompozyty warstwowe*, omówiona została specyficzna budowa tej klasy materiałów oraz wynikające z niej właściwości użytkowe, w szczególności ważne w aspekcie celu pracy charakterystyki jak sztywność, wytrzymałość na zginanie, gęstość powierzchniowa, energochłonność. Zwrócona została uwaga na charakterystyczne dla tej grupy materiałów sposoby zniszczenia jak np. delaminacja czy utrata stateczności, ale też zalety, do których należy osiągalna energochłonność w warunkach głównie dynamicznych obciążeń mechanicznych. Dokonany został przegląd dotychczasowych zastosowań kompozytowych laminatów polimerowych.

Rozdział 3 został poświęcony tematyce bezzałogowych statków powietrznych (BSP), które oferując bogate możliwości wykorzystania motywują do intensywnych poszukiwań co raz lepszych rozwiązań materiałowych, w tym z obszaru przedmiotowych laminatów - kompozytów warstwowych.

Kolejny, 4 rozdział pracy – *Dobór komponentów* - zawiera przegląd dotychczasowej problematyki z obszaru inżynierii materiałowej, w szczególności związanej z wyborem cech materiałowych komponentów stosowanych w wytwarzaniu laminatów stosowanych współcześnie w przemyśle. Omówione zostały podstawowe właściwości materiałów z grupy dotychczas stosowanych – osnowy i zbrojenia okładzin oraz warstw rdzennych. Rozdział zawiera również opisy metod wytwarzania kompozytów warstwowych.

W rozdziale 5 dokonany został literaturowy przegląd metod badawczych laminatów polimerowych kompozytów warstwowych w zakresie ich właściwości wytrzymałościowych w warunkach zginania, ścinania, uderzenia.

Rozdział 6, *Cele pracy*, początkuje część pracy poświęconą badaniom własnym. Na podstawie sformułowanej listy celów cząstkowych opracowany został zawarty w rozdziale 7 *Program badań doświadczalnych materiałów warstwowych*. Kierując się opracowanym na wstępie algorytmem postępowania doktorantka przedstawia kolejno charakterystyki materiałowe składników badanych kompozytów, a następnie, w rozdziale 8 *Opisy badań* zmierzających do wyznaczenia charakterystyk kompozytu i jego składowych. Badaniem zostały objęte niezależnie mieszaniny żywic zastosowane do wytworzenia warstw laminatu oraz próbki kompozytów warstwowych. W odniesieniu do pierwszych wymienia wyznaczane wielkości: gęstość, charakterystyki dynamiczne wyznaczane metodą DMA, lepkość. W odniesieniu do kompozytów szczegółowo omawia udarność wraz z zastosowaną metodą Charpy'ego jej wyznaczania, w tym stanowiskiem do jej wyznaczania. Jako alternatywną charakterystykę dla udarności przedstawia odporność na przebicie. W tym przypadku, obok opisu samej metody oraz zastosowanego stanowiska pomiarowego, podaje miarę wytrzymałości kompozytu warstwowego w postaci całkowitej absorpcji energii (TEA), absorpcji energii właściwej (SEA) oraz sposób jej wyznaczania. Opisuje próbę zginania trójpunktowego oraz wyznaczane charakterystyki, powołując się na normę PN-EN ISO 7438. Kolejną jest próba wyznaczania odporności na propagację pęknięć ( $K_C$ ). Wskazuje na sposób prowadzenia próby i wyznaczania współczynnika odporności na pęknięcie. Nie podaje normy będącej podstawą zamieszczonego opisu. Ostatnią z

omawianych charakterystyk jest wytrzymałość na ścinanie. Opisany sposób jej wyznaczania to metoda krótkiej belki, z powołaniem na normę PN-EN ISO 14130: 2001.

Rozdział 9 zawiera opis przygotowania materiału do badań oraz przeprowadzonych eksperymentów. Na wstępie zestawione zostały szczegółowe identyfikatory handlowe użytych materiałów składowych: żywicy, napełniacza, utwardzacza osnowy oraz tkanin wzmocnienia laminowanych okładzin i międzywarstw rozdzielających rdzenie piankowe oraz samych materiałów rdzeni. Planem badań zostały objęte próbki żywic zastosowanych jako osnowy warstw laminatów różniące się udziałem PU (0, 5, 10, 15 i 20%) oraz laminatów o różnej gęstości i grubości tkanin wzmocnienia (220 g/m<sup>2</sup> o splocie płóciennym i 300 g/m<sup>2</sup> o splocie skośnym). Opisana została technika samodzielnego przygotowania próbek do badań, żywic, laminatów i kompletnych kompozytów warstwowych. Próbki każdego rodzaju poddane zostały badaniom, według wcześniej ustalonego planu, w tym próbki żywic badaniu gęstości, lepkości, czasu żelowania, udarności PN-EN ISO 179, odporności na zginanie 3-punktowe PN-EN ISO 178 oraz pękanie. W tym ostatnim przypadku normy nie podano.

W ppkcie 9.1. przedstawiony został proces przygotowania kompozycji żywicy z PU zastosowanych w objętych programem badań laminowanych warstwach wzmocnionych tkaniną, z dedykowanych do finalnych kompozytów warstwowych. W ppkcie 9.1.1. zawarto prezentację metodyki badań żywic. Kolejno przedstawione zostały urządzenia oraz sposoby przeprowadzania badań na stanowiskach do pomiaru lepkości, czasu żelowania, udarności metodą Charpy'ego (aparatus Zwick 5012), odporności na zginanie (aparatus Zwick/Roell), odporności na propagację pęknięć (aparatus Zwick Z010), następnie, w ppkcie 9.1.2. wyniki badań żywicy. Po wstępnej analizie wyników programem dalszych badań laminowanych okładzin i kompozytów warstwowych objęto jedynie produkty z udziałem żywic o zawartościach 0, 5 i 10% PU, uznając ich własności jako najkorzystniejsze z punktu widzenia finalnych własności. Liczba wariantów kompozytów warstwowych, wynikająca z kombinacji wziętych pod uwagę materiałów składowych, a stąd i rodzajów badanych próbek tych kompozytów wyniosła 12.

W ppkcie 9.2. przedstawiony został zbiór objętych programem badań próbek kompozytów warstwowych oraz sposób ich przygotowania.

Ppkt 9.2.1. zawiera prezentację metodyki – badania udarności oraz trójpunktowego zginania zostały przeprowadzone niezależnie od odpowiadających im badań, jakim poddano próbki kompozycji żywicy. Ppkt 9.2.2. zawiera analizę wyników badań kompozytów, przy czym badaniom DMA poddane zostały tylko próbki utwardzonych warstw wzmocnionych tkaninami. Kolejne z pozostałych badań przeprowadzone zostały na próbkach wraz z warstwami rdzennymi z pianek. Wzięto pod uwagę dwa typy, różniące się grubością warstw rdzeni - pianki (Airex R 63.80, Airex R 63.140).

Próbki kompozytów warstwowych poddano, podobnie jak w przypadku samych żywic, pomiarom gęstości objętościowej, udarności metodą Charpy'ego, wg normy EN ISO 179-1 (Młot Charpy'ego Galdabini Impact 25), odporności na 3-punktowe zginanie, wg normy PN-EN ISO 178 (aparatus Zwick/Roell), wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe metodą krótkiej belki ILSS w oparciu o normę P N EN ISO 14130:2001, odporności na przebicie – za pomocą młota spadowego Instron Ceast 9340. Ponadto postacie zniszczenia w warunkach próby na przebicie zostały zobrazowane za pomocą profilometru.

Uzyskane wyniki badań wybranych próbek kompozytów Doktorantka porównuje z charakterystykami dostępnymi na rynku materiałów wykorzystywanych w budowie bezzałogowych statków powietrznych. Zwraca uwagę, że istotne znaczenie dla odsunięcia zagrożenia katastrofalnymi uszkodzeniami kompozytów warstwowych ma zapobieżenie podstawowym trybom zniszczenia, które przy zginaniu trójpunktowym można skategoryzować jako: marszczenie lica, ścinanie rdzenia, wgniecenie i odpajanie lica od rdzenia. Niedopuszczalne

są pęknięcia na powierzchni ściskającej, prowadzące do lokalnych pęknięć, zarówno na powierzchni ściskanej, jak i w rdzeniu pianki, oraz odspajanie lica od rdzenia w miejscu przyłożonej siły.

W rozdziale 10 przedstawiona została metoda oraz wyniki analizy statystycznej mającej na celu określenie wpływu zmiany wartości poszczególnych, przyjętych za niezależne zmiennych w zbiorze badanych próbek, to znaczy rodzaju wzmocnienia, rodzaju zastosowanego rdzenia piankowego oraz zawartości PU w laminowanych okładzinach i międzywarstwach, na wartości wszystkich składowych funkcji odpowiedzi. Przyjmując liniowy model regresyjny z interakcjami, po przeprowadzonej identyfikacji jego parametrów – współczynników regresji oraz interakcji wyróżnionych cech kompozytu warstwowego, Doktorantka sformułowała na jego podstawie wnioski dotyczące wpływu zmiennych modelowych na potwierdzone wynikami eksperymentalnymi charakterystyki, t.j. na maksymalną wartość naprężenia przy trójpunktowym zginaniu, wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe, pole uszkodzonej powierzchni laminatu po uderzeniu młotem spadowym z energią 7J [mm<sup>2</sup>] oraz odporność na przebicie wyznaczaną na młocie spadowym przy uderzeniu z energią 30J.

W szczególności we wnioskach zawarła stwierdzenia, iż:

1. Rodzaj zastosowanej tkaniny:
  - a) nieznacznie podwyższa naprężenie podczas trójpunktowego zginania ( $b_1 = 0,23$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 0,05$ );
  - b) poprawia odporność na uderzenia z niską energią 7J ( $b_1 = -9,74$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 1,62$ ).
2. Rodzaj zastosowanej pianki:
  - a) ma największy wpływ na wzrost naprężenia w trakcie testu trójpunktowego zginania ( $b_2 = 2,74$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 0,05$ );
  - b) indukuje wzrost wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe ( $b_2 = 0,18$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 0,05$ );
  - c) moduluje rozmiar obszaru podczas oddziaływania z energią 7J ( $b_2 = -21,29$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 1,62$ );
  - d) posiada największą rolę podczas testu odporności na przebicie z energią 30J ( $b_2 = 23,98$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 1,13$ );
3. Implementacja modyfikatora w postaci poliuretanu do lepiscza międzywarstwowego:
  - a) za sprawą poliuretanu, który nadaje elastyczność kruchej żywicy epoksydowej, redukuje wielkość wgłębienia podczas uderzenia z energią 7J ( $b_3 = -2,47$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 1,62$ );
  - b) potęguje odporność na przebicie podczas uderzenia z energią 30J ( $b_3 = -2,35$  dla poziomu istotności  $b_{istot} = 1,13$ );

Na podstawie uzyskanych wyników, idąc dalej, sformułowała wnioski praktyczne, mające być przydatne do konstytuowania kompozytów o założonych właściwościach.

Interpretując wprost postać modelu regresyjnego, Doktorantka stwierdza, że największy wpływ na właściwości wytrzymałościowe otrzymanych kompozytów ma rodzaj zastosowanego rdzenia, który wpływa na wszystkie analizowane właściwości kompozytu warstwowego. Z kolei rodzaj zastosowanego wzmocnienia ma najmniejszy wpływ na właściwości wytrzymałościowe, co jednak nie neguje jego znaczenia. Odnosząc się do jednego z głównych celów pracy, jakim było zbadanie wpływu dodatku poliuretanu do lepiscza międzywarstwowego na właściwości wytrzymałościowe całego kompozytu, na podstawie analizy statystycznej, wskazuje na widoczną poprawę parametrów wytrzymałościowych po zastosowaniu modyfikacji. Zauważa, że modyfikowana poliuretanem żywica epoksydowa, będąca lepisczem warstw laminatu, ma kluczowe znaczenie dla wytrzymałości całego kompozytu, a dobra adhezja jest niezbędna do uzyskania satysfakcjonujących parametrów wytrzymałościowych.

### 3. Ocena poprawności naukowej.

Praca charakteryzuje się poprawną strukturą logiczną. Na wstępie Doktorantka dokonuje przeglądu stanu wiedzy z obszaru objętego programem planowanych badań. Wskazuje obszary warte poszerzenia, z uwagi na rozwijane kierunki poszukiwania konkurencyjnych materiałów dedykowanych do konstrukcji bezzałogowych statków powietrznych, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i odpornością na uderzenia, przy jednocześnie niewielkiej wadze, co przykłada się w płytowych i powłokowych elementach na niską gęstość powierzchniową. Pobocznym kryterium jest możliwie prosta technologia wytwarzania materiału. Skłaniając się do klasy sprawdzonych rozwiązań z grupy materiałów warstwowych, z udziałem nośnych warstw laminatowych oraz strukturalnych, funkcjonalnych lekkich warstw piankowych – spienionego PVC, wyborowi wielowarstwowości nadaje charakter aktu odwagi, choć nie wskazuje wobec jakiego zagrożenia. Program poszukiwań korzystnego rozwiązania autorka pracy opiera na wstępnie założonej strukturze kompozytu, złożonej z 4 warstw laminatu poliestrowego rozdzielonych warstwami pianki. Uzasadnienie takiego wyboru jest raczej deklaracją własnego przekonania i mogłoby zostać przyjęte za część tezy pracy, jednak zakres badań nie dostarcza uzasadnienia szczegółów wyboru.

W ramach algorytmu programu badań doświadczalnych, przedstawionego w ppkcie 7.1. rozdziału 7, Autorka wskazuje na potrzebę opracowania planu eksperymentu oraz określenie warunków brzegowych. Liczba pojedyncza wskazuje, że eksperymentem nazwana jest doświadczalna weryfikacja celowości stosowania innowacyjnej struktury kompozytów warstwowych w określonej grupie materiałowej. Druga część zadania, określenie warunków brzegowych, nie została wyodrębniona w szczegółowym opisie przeprowadzonych badań. Kolejny ppkt 7.2. rozwija zadanie wyboru składników kompozytu rozumianego jako warstwowy, złożony z warstw laminatu oraz wybranego rodzaju pianki PCV. Zamieszcza listę materiałów użytych do wytworzenia próbek do badań własnych. Są to:

- żywica epoksydowa - Epidian 5 utwardzana poliaminowym utwardzaczem Z1;
- poliuretan - Desmocap 12 używany jako modyfikator Epidianu 5;
- tkaniny aramidowe o splocie płóciennym ( $220\text{g/m}^2$ ) i skośnym ( $300\text{g/m}^2$ );
- certyfikowane pianki lotnicze PVC - AIREX R63.80 i R63.140.

Przedstawia charakterystyczne właściwości składników. Warto w tym miejscu zauważyć, że podkreśla zróżnicowanie elastyczności i stabilności strukturalnej dwóch zastosowanych tkanin, jako efektu odmiennego splotu oraz gramatury. W szczególności dostępne sploty – płócienny i skośny, nie pozwalają na funkcyjne uporządkowanie dostępnej oferty rynkowej tkanin aramidowych.

W Rozdziale 8 zestawione zostały opisy badań, jakie zostały przeprowadzone w części doświadczalnej pracy. Brak w tym miejscu informacji jakie materiały zostały poddane poszczególnym badaniom. Informacje te, wraz z dodatkowymi szczegółami dotyczącymi poszczególnych serii badań, zostały zamieszczone w kolejnych ppktach rozdziału 9. Taki układ treści wydaje się niezręczny. Niepotrzebnie komplikuje układ pracy, gdyż wiele informacji z tych ogólnych opisów zostaje powtórzonych w odpowiadających im opisach badań w części doświadczalnej, gdzie badania pogrupowane są już według poddanych im rodzajach próbek materiałów. Brak norm, na których badania są prowadzone, z wyjątkiem próby zginania trójpunktowego oraz wytrzymałości na ścinanie. Z dalszej części pracy wynika, że część spośród opisanych metod wykorzystana została do badań żywic w stanie płynnym (gęstość, lepkość, czas żelowania), inne do wyznaczania charakterystyk żywic utwardzonych i kompozytów warstwowych (udarność, odporność na zginanie 3-punktowe), odporność na przebicie do kompozytów warstwowych, a analiza dynamiczna DMA do wzmocnionych tkaninami warstw laminatu. W odniesieniu do badań udarności, odporności na zginanie 3-punktowe przywołane

zostały normy, z których wynika, że obszar ich stosowania nie obejmuje pianek czy kompozytów je zawierających. Brak odniesienia do norm wyznaczania odporności na propagację pęknięć oraz przebicie.

Szczegóły badań oraz wyniki zamieszczono w pktcie 9 pracy. W prozdz. 9.1.1. i 9.2.1., poświęconych metodyce badań, znaczna część danych i opisów została powtórzona, przykładowo łącznie z fotografiami z rys. 56 i 58 urządzeń badawczych.

W ppkcie 9.1 znalazły się opisy sposobu przygotowania próbek żywicy z PU, a w ppkcie 9.1.1. metodyka ich badania. W przypadku prób udarności oraz zginania trójpunktowego stanowiska badawcze były różne od opisanych w rozdziale 8.

Ponadto zamieściła opis niewymienionej wcześniej metody pomiaru czasu żelowania żywic, bez podania normy. Został ustalony zakres zmienności składu fazowego kompozytu i warunki badań oraz przedstawiony zakres udziału poliuretanu w mieszaninie z żywicą epoksydową. W ppkcie 9.1.2. Doktorantka zamieściła wyniki badań lepkości, czasu żelowania żywicy, udarności, odporności na zginanie i propagację pęknięć utwardzonych żywic warstw laminowanych. Wyniki pomiarów lepkości przedstawione zostały na wykresie 1. Zastosowana interpolacja liniowa obejmuje jedynie kompozycje z 0, 5 i 10% zawartością PU. W dalszej kolejności zamieściła wyniki pomiaru udarności próbek żywicy wg normy PN-EN ISO 179 oraz odporności na zginanie wg normy PN-EN ISO 178. Przedstawiła również wyniki pomiarów odporności na propagację pęknięć próbek wykonanych z samych mieszanin żywic dla różnych zawartości PU. Wyznaczyła czasy żelowania badanych mieszanek. Każdemu z badań poddała 3 próbki materiału. Kierując się wynikami badań kompozycji żywic, wytypowała do dalszych badań kompozytów warstwowych żywice z zawartością 5 i 10% poliuretanu.

Opracowanym programem badań płyt warstwowych, opisanym w podrozdziale 9.2., objęła próbki charakteryzujące się możliwymi kombinacjami zastosowanej osnowy, tkaniny wzmocnienia i różniących się grubością warstw przekładki piankowej. Na wstępie powtórzyła w znacznym stopniu opis metod badań obejmujących tę grupę materiałów, wykorzystanych wcześniej w badaniach utwardzonych żywic. W punkcie 9.2.1. opisała aparaturę wykorzystaną w badaniach, w tym do dynamicznej analizy mechanicznej wzmocnionych warstw laminowanych, za pomocą aparatu DMA Q800 TA Instruments. Analiza dynamiczna objęła 6 wariantów strukturalnych próbek warstw z utwardzonych żywic, różniących się zawartością PU oraz rodzajem tkaniny wzmocnienia tkaninami aramidowymi, wchodzących w strukturę kompozytów warstwowych. W dalszej kolejności poddała badaniom wynikające z kombinacji kompozycji żywicy oraz tkanin wzmacniających, 12 wariantów kompozytu warstwowego. Samodzielnie wykonała próbki kompozytów warstwowych, sposobem opisanym w pracy. Szczegółowo opisała warunki prób odporności na przebicie, co jest pewną niekonsekwencją w stosunku do pozostałych badań. Dodatkowo opisała badanie polegające na obrazowaniu zniszczeń za pomocą profilometru.

Kolejny podpunkt 9.2.2. zawiera wyniki opisanych w rozdziale 9 badań. Zamieszczone zostały wyniki analizy dynamicznej - zależności modułów zachowawczego i stratności – dwie rodziny zależności odpowiadających brany pod uwagę 2 tkaninom wzmocnienia i 3 analizowanym udziałom PU. W odniesieniu do tych, jak również dalszych, przeprowadzonych na próbkach kompozytów z przekładkami badań brak danych o liczbie wykonanych pomiarów.

W następnej kolejności wyznaczona została objętościowa gęstość masowa badanych materiałów warstwowych. Można by postawić pytanie czy właściwszą charakterystyką użytkową nie powinna być powierzchniowa gęstość masowa. Ma to wpływ na wynik późniejszych porównań z kompozytami określonymi jako komercyjne, szczególnie w aspekcie ich jakości w zastosowaniu do konstrukcji BSP, w których przedmiotowe kompozyty pełnią funkcję płyt lub powłok.

Próby udarności Charpy'ego, przeprowadzone, jak napisano w pracy, zgodnie z normą EN ISO 179-1, wykazały brak możliwości jej określenia, ze względu na brak całkowitego przełomu próbek. Wcześniej, w pktcie 8, opisując ogólnie metody badań, Doktorantka wykorzystanie młota

Charpy'ego do kompozytów warstwowych uznała za niewłaściwe, niemniej badania takie przeprowadza rejestrując jedynie wartości pochłoniętej energii i prowadząc analizę porównawczą.

Postać zniszczenia została opisana jako wgniecenie w miejscu uderzenia, podobna dla wszystkich próbek. Brak fotografii. Ogólna zasada mówi, że zastosowana metoda nie nadaje się do badania materiałów spienionych i wielowarstwowych struktur zawierających materiał spieniony, co potwierdza brak możliwości określenia udarności. Opis wyników próby, jedynie jakościowy, nie daje możliwości wykorzystania w procedurze ilościowej optymalizacji. Posiada wartość porównawczą.

Próba 3-punktowego zginania została przeprowadzona według przywołanej normy PN-EN ISO 178. Według opisu, norma ta „(...) stosuje się do badania sztywnych tworzyw termoplastycznych przeznaczonych do prasowania, wtrysku i wytłaczania, sztywnych tworzyw termoutwardzalnych przeznaczonych do prasowania, wtrysku i wytłaczania, sztywnych tworzyw termoutwardzalnych przeznaczonych do formowania, termoutwardzalnych i termoplastycznych kompozytów wzmocnionych włóknami oraz do termotropowych polimerów ciekłokrystalicznych”. Tego typu prób nie stosuje się do tworzyw piankowych, o czym przekonują trudności z interpretacją otrzymanych wyników. Doktorantka wprowadza kryterialną, pozanormową wielkość „wglębienia (,,) na wysokość” nie podając jej precyzyjnej definicji. W tabeli 18 zestawione zostały maksymalne wartości naprężenia i odkształcenia. Można postawić pytanie o sposób wyznaczenia i miejsce wystąpienia naprężeń maksymalnych a także o interpretację odkształcenia maksymalnego, które znacznie się różni dla poszczególnych próbek, pomimo przyjętej jednakowej wartości 20 mm dla „wysokości wglębienia”. Wyniki przedstawiają wartość porównawczą, jednak co najwyżej w grupie podobnych materiałów, jak w przypadku badanych w pracy. Ocena w ten sposób określonej wytrzymałości jako wysokiej, wymagałoby wskazania względem czego.

Kolejne badania – wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe metodą krótkiej belki zostało przeprowadzone według normy PN EN ISO 14130:2001. Ta metoda jest dedykowana do sztywnych kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknem. Nie nadaje się do kompozytów przekładkowych ani piankowych. Krótka belka ma sprawić dominację naprężeń stycznych w środkowej warstwie próbki. W istotnie zróżnicowanych warstwach kompozytu rozkład naprężeń stycznych jest zgoła inny. Wyliczone wartości naprężeń stycznych, zobrazowane na wykresie 7, nie odpowiadają rzeczywistemu rozkładowi naprężeń ścinających. Potwierdza to opisany przez Doktorantkę sposób zniszczenia – rozwarstwienie pod okładziną (brak fotografii), czyli w przekroju, w którym w klasycznym modelu ścinania naprężenia zmierzają do minimum. Analiza tego efektu mogłaby dostarczyć interesujących wniosków dla projektowania badanych kompozytów warstwowych. Interpretacja, według której przyczyną delaminacji jest silniejsza adhezja od wytrzymałości pianek nie wyjaśnia położenia ściętej warstwy. Inny jest też obraz zniszczenia. Określone wcześniej wzorem (13) naprężenia ścinające, w przypadku kompozytu warstwowego nie posiadają modelowego odpowiednika, a określający je wzór wynikową wartością nie znajduje odniesienia do stanu obciążeń wewnętrznych w materiale warstwowym. Podobnie jak w przypadku próby zginania, wyniki przedstawiają wartość porównawczą, jednak co najwyżej w grupie podobnych materiałów, jak w przypadku będących przedmiotem pracy. Wyniki pojedynczych eksperymentów nie pozwalają na zbyt szczegółowe, wiarygodne wnioski, jednak znamienne jest mniejszy wpływ modyfikacji 10% udziałem PU, a w przypadku tkaniny o splocie płóciennym wręcz spadek wytrzymałości. Czy to efekt systematyczny? Brak komentarza w pracy. Interpretacja obrazów ścięcia warstw w próbach udarowych nie daje podstaw do oceny adhezji. Sama Autorka wcześniej zauważa, że ścięciu ulega pianka, zaś jej grubość i gęstość wpływają na stan naprężenia w przekrojach bliskich połączeniom, zatem to różne wartości tych ostatnich mogą wpływać na różny obraz zniszczenia. W pracy brak szerszego materiału dotyczącego wyników tych prób.



Podsumowując uwagi do przywołanych badań kompozytów warstwowych należy podkreślić, że w zbiorze warstw z reguły znajdują się różniące się między sobą zarówno parametrami geometrycznymi jak i materiałowymi, a nawet całościowym modelem konstytutywnym – przykładowo metale, elastomery, pianki, warstwy makrostrukturalne - co komplikuje zadanie określania charakterystyk globalnych. Różnorodność materiałów kompozytowych, mnogość różnych mechanizmów ich zniszczenia, wzajemne powiązania między nimi, trudności z doświadczalną weryfikacją kryteriów wytrzymałościowych (duże rozrzuty wyników, brak ujednoczonych procedur badawczych, nieodpowiednie niekiedy techniki eksperymentalne) sprawiają, że w chwili obecnej nie istnieje uniwersalna teoria wytrzymałościowa dla tego typu laminatów. Mówiąc inaczej - nie sposób jest określić ich wytrzymałość przyjmując jako poziom obserwacji laminat jako całość. Konieczne jest zejście na poziom poszczególnych warstw i dopiero w oparciu o ich „intensywne” własności wytrzymałościowe zbudować algorytm analizy wytrzymałościowej odnoszący się do laminatu. To sprawia, że istnieje w tym zakresie pewna dowolność, której odzwierciedleniem jest istnienie różnych metod wyznaczania wytrzymałości laminatów. Analizę komplikuje także fakt, że wszystkie kryteria dotyczące poszczególnych warstw bazują na charakterystykach wytrzymałościach określonych w ich głównych osiach materiałowych, często zależnych od anizotropowości materiałów warstw. W analizie laminatu stosuje się natomiast dowolnie przyjęty globalny układ odniesienia. Nieograniczone możliwości orientacji poszczególnych warstw względem tego układu powodują, że z reguły mamy do czynienia z wielością układów współrzędnych, co może prowadzić do pewnych komplikacji obliczeniowych. O wytrzymałości laminatu decydują charakterystyki wytrzymałościowe i sztywnościowe warstw, charakterystyki temperaturowe (współczynniki rozszerzalności cieplnej), sekwencja ułożenia warstw i ich udział objętościowy. Manifestują się one w lokalnych mechanizmach zniszczenia, czego nie oddają wyniki badań „ekstensywnych”, jak zginania czy udarności złożonego strukturalnie kompozytu.

Najwięcej miejsca Doktorantka poświęciła badaniom na przebicie próbek kompozytów warstwowych. Zostały one przeprowadzone według autorskiego programu obejmującego próbki o badanych 12 kombinacjach parametrów strukturalnych. Podkreśliła wagę tych badań, jako najbardziej zbliżonych do eksploatacyjnych zagrożeń zniszczeniem BSP. Ten typ badań w odniesieniu do kompozytów z warstwami pianki jest najbardziej obiektywny, gdyż nie wymaga porównań z odmiennymi materiałami litymi, natomiast pozwala na porównanie charakterystyk wytrzymałościowych w grupie materiałów podobnych. Kolejne serie badań to:

- przy rosnącej energii uderzenia, w przedziale [7, 80J], do znaczącego uszkodzenia przeciwległej okładziny próbki;
- przy stałej energii uderzenia – 30[J];
- przy stałej energii uderzenia – 7[J].

W pierwszej pomierzono pola powierzchni śladu uderzenia. Ocena pozwoliła na stwierdzenie korzystnego wpływu modyfikacji oraz większej grubości warstwy pianki w zbiorze badanych wariantów.

W drugiej serii zostały wyznaczone charakterystyki siły, odkształcenia, energii i odporność na przebicie. Umowna wartość energii 30[J], została ustalona na podstawie szacunkowego wyliczenia energii uderzenia drona o nieruchomą przeszkodę. Pomija przy tym możliwość zderzenia z ruchomą przeszkodą. Dla kolejnych wariantów struktury badanych próbek warstwowych powłok wyznacza szczytowe wartości siły, energii i przemieszczenia. Sprecyzowania wymagałoby określenie wielkości w tłumaczeniu nazwanych „pikiem energii” i „pikiem przemieszczenia” oraz sposobu ich pomiaru. Oznaczenie energii  $E_i$  we wzorze (15) może odnosić się do wcześniej określonej energii inicjacji. Wzory (15 – 17) nie są w pełni zrozumiałe i chyba błędnie zapisane. Ich wyjaśnienie jest o tyle istotne, że zawarte w nich wielkości zostały

przyjęte jako kluczowe w modelu i analizie statystycznej wyników badań na przebicie. Brak w opisie wyników próby wyjaśnienia sposobu wyliczenia odporności na przebicie.

W trzeciej pomierzono pola powierzchni śladu uderzenia. Dokonano wizualizacji powierzchni próbek za pomocą profilometru. To interesujące wyniki, choć brak informacji o liczbie powtórzeń prób dla każdego z wariantów strukturalnych kompozytu. Może to oznaczać, że każda z prób była wykonana 1- krotnie, na co wskazuje ogólnikowy charakter wniosków, np., że uszkodzenia powstałe wskutek obciążeń mogą być różnorodne.

W punkcie 9.2.3. Doktorantka dokonuje porównania wytworzonych kompozytów warstwowych z komercyjnymi materiałami wykorzystywanymi do budowy dronów. Porównania, a zatem i wynikające z nich wnioski, są dosyć przypadkowe. Podstawą porównań mogą być jednorodne charakterystyki, przy czym ich wybór wiąże się z zachowaniem jednakowych wartości charakterystyk pozostałych. Można zatem porównywać cenę produktów o jednakowych charakterystykach użytkowych, np. wytrzymałościowych, fizycznych czy geometrycznych. Można porównywać gęstość, przy porównywalnych pozostałych charakterystykach użytkowych, choć w przypadku powłokowych elementów statków powietrznych miarodajną charakterystyką użytkową jest raczej gęstość powierzchniowa, z uwagi na związek z geometrią i miarą powierzchni elementów konstrukcji skrzynekowych oraz siłą nośną płatów wirników. Dla elementów ramowych istotna może być gęstość liniowa, i sztywność giętna, ważna jest anizotropia materiału. Można tworzyć kryterialne charakterystyki łączące w sposób uzasadniony istotne charakterystyki cząstkowe, jest to podstawą polioptymalizacji, jednak takie porównanie wymaga jednakowych pozostałych, spośród istotnych dla danego układu, wielkości. Zestawienie w tabeli 23 porównywanych materiałów nie zawiera pełnych informacji o warunkach porównań, przez co oparcie na zamieszczonych komentarzach kryteriów wyboru materiałów byłoby trudne.

W rozdziale 10 przedstawiona została metoda oraz wyniki analizy statystycznej mającej na celu określenie wpływu zmiany wartości poszczególnych, przyjętych za niezależne, zmiennych w zbiorze badanych próbek, to znaczy rodzaju wzmocnienia, rodzaju zastosowanego rdzenia piankowego oraz zawartości PU w laminowanych okładzinach i międzywarstwach, na wartości wszystkich tzw. składowych funkcji odpowiedzi, za które Doktorantka przyjęła w jej ocenie istotne charakterystyki wytrzymałościowe kompozytów warstwowych, t.j. na maksymalną wartość naprężenia przy trójpunktowym zginaniu, wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe, pole uszkodzonej powierzchni laminatu po uderzeniu młotem spadowym z energią 7J [mm<sup>2</sup>] oraz odporność na przebicie wyznaczaną na młocie spadowym przy uderzeniu z energią 30J. Za podstawę przyjęła zebrane dane empiryczne. Wstępnie zależnościom określającym wpływ wybranych charakterystyk materiałowych na charakterystyki wytrzymałościowe nadała postać liniowego modelu regresyjnego z interakcjami. Na jego podstawie sformułowała przytoczone wcześniej wnioski dotyczące wpływu zmiennych modelowych na potwierdzone wynikami eksperymentalnymi charakterystyki wytrzymałościowe. W tym miejscu należy przywołać uwagi krytyczne dotyczące wartości ilościowo określonych wyników badań wybranych charakterystyk wytrzymałościowych. Wątpliwości budzi też poprawność postaci funkcji modelu obiektu badań, jako że wzmocnienia aramidowe i rdzenie piankowe objęte planem badań trudno związać jakąś funkcją, o czym wspomniano w omówieniu ppktu 7.2.. Tkaniny aramidowe różnią się nie tylko gramaturą ale i splotem, którego znaczący wpływ stwierdziła Doktorantka. Podobnie, badane rdzenie różnią się grubością ale również gęstością czy sztywnością. Należałoby zatem ograniczyć model regresyjny do udziału PU, odrębnie dla każdej kombinacji pozostałych składników kompozytów lub uwzględnić w postaci stałych w odrębnych modelach. Celowość budowy takiego modelu zwyczajowo wynika z potrzeby wykorzystania do predykcji, w tym przypadku wartości wynikowych charakterystyk wytrzymałościowych dla alternatywnych wartości charakterystyk materiałowych kompozytu warstwowego, gdyż model regresyjny interpretowany jest z reguły jako funkcja ciągła. W analizowanym przypadku zbiory wartości wybranych charakterystyk

wytrzymałościowych są dyskretne, z uwagi na brak ciągłości typów możliwych piankowych rdzeni czy rodzajów wzmacniającej tkaniny. Predykcją można by objąć jedynie zawartość poliuretanu, możliwą do ciągłego dozowania. Sformułowane wnioski, na podstawie modelu regresji można w odniesieniu do wzmocnienia i rdzeni ograniczyć do szczególnych przypadków wariantów ich współwystępowania.

Uwagi szczegółowe dotyczą edytorskiej strony pracy. W tekście pracy znalazły się dosyć liczne usterki językowe i drobne błędy przestankowe, literówki. Rysunki zaczerpnięte z literatury są złej jakości, a ich opisy przygodną czcionką i w przygodnym języku. Nie wpływa to na zrozumienie treści, jednak szersze udostępnienie wyników powinno zostać poprzedzone staranną korektą.

#### 4. Podsumowanie

Praca podejmuje interesujący, aktualny temat związany z rozwojem ważnej grupy materiałów, jaką stanowią kompozyty warstwowe. Znajdują one szerokie i ważne miejsce dzięki możliwościom projektowania materiałów o charakterystykach użytkowych niespotykanych wśród materiałów tradycyjnych. Pozwalają kojarzyć różnorodne właściwości fizyczne jak wytrzymałość, sztywność, stateczność, izolacyjność, charakterystyki masowe, własności powierzchni i wiele innych. Specyficzne wymagania stawiane są materiałom dedykowanym konstrukcjom maszyn latających, w tym dronom. Kryterialne charakterystyki współcześnie powszechnie wskazują na konkurencyjność materiałów tej klasy, w znacznym stopniu dzięki rozwojowi inżynierii materiałów polimerowych oferujących korzystne charakterystyki mechaniczne, w tym wytrzymałościowe, w połączeniu z małą gęstością i nieograniczonymi możliwościami projektowania tych materiałów. Właśnie w tym obszarze mieści się podjęte w pracy zadanie zbadania wpływu modyfikacji materiałowej wybranego typu kompozytu warstwowego na charakterystyki istotne w eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych, co ma również wymiar ogólniejszy. Doktorantka dokonała szerokiego przeglądu literatury z zakresu powiązanego z podjętym zadaniem, znajdując miejsce na jego oryginalne sformułowanie. Opracowanym programem badań, objęła szeroki i poprawnie dobrany zbiór charakterystyk kompozytów dobierając jednocześnie właściwe metody, aparaturę i stanowiska badawcze. Uporządkowała ogrom różnorodnych wyników przeprowadzonych badań, udokumentowała je w sposób poprawny i poddała autorskiej interpretacji wyciągając wnioski zawierające odpowiedzi na postawione w pracy pytania. Dotyczyły one w szczególności wpływu wybranych cech materiałowo-konstrukcyjnych – udziału modyfikującego zastosowaną żywicę poliestrową poliuretanu, rodzaju tkaniny wzmocnienia laminowanych warstw i rdzenia ze spienionego PVC, na ważne charakterystyki wytrzymałościowe kompozytowych, warstwowych elementów płytowych. Niektóre spośród interpretacji wyników badań są dyskusyjne, jednak świadczy to o twórczej samodzielności i dojrzałości naukowej Pani mgr inż. Martyny Roszowskiej-Jarosz.

Podsumowując analizę treści rozprawy, mając na uwadze poprawność postawionej tezy, wyboru metod badawczych oraz przeprowadzonych eksperymentów prowadzących do jej udowodnienia, wartość naukową prowadzonych rozważań oraz uzyskanych wyników, rzeczowość wniosków, stwierdzam, że wytyczone cele pracy zostały osiągnięte. Główny cel, jakim było zaprojektowanie, wytworzenie oraz scharakteryzowanie wybranych właściwości mechanicznych nowego, polimerowego kompozytu warstwowego, który będzie mógł stanowić alternatywę dla obecnie stosowanych materiałów, w produkcji elementów bezzałogowych statków powietrznych (BSP) został poszerzony poprzez wskazanie metody opracowania planu badań doświadczalnych oraz zastosowania metody statystycznej do poszukiwania rozwiązań materiałowych i strukturalnych najkorzystniejszych w świetle wybranych kryteriów. W szczególnym, podjętym w

pracy zadaniu oceny wpływu wybranych jako niezależne cech badanej klasy kompozytów warstwowych: rodzaju tkaniny wzmacniającej w poliestrowej matrycy warstw litych oraz grubości rdzeni piankowych, na charakterystyki wytrzymałościowe złożonego materiału, wykazała dominujący wpływ zawartości poliuretanu. Jest to oryginalny i wartościowy wniosek, użyteczny w kształtowaniu charakterystyk ważnych w procesie projektowo-konstrukcyjnym układów zawierających badane kompozyty, do których należą bezzałogowe statki powietrzne.

## 5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę dotychczasowe osiągnięcia naukowe Pani mgr inż. Martyny Roszowskiej-Jarosz, a w szczególności:

1. wysoką ocenę osiągnięcia naukowego, jakim jest opracowana dysertacja pt. *„Wpływ modyfikacji osnowy na wybrane właściwości mechaniczne polimerowych kompozytów warstwowych przeznaczonych do budowy elementów bezzałogowych statków powietrznych”*;
2. Poziom naukowy oraz wartość praktyczną sformułowanego celu pracy;
3. Poprawność metodologiczną;
4. Znajomość metod badawczych. umiejętność posługiwania się aparaturą badawczą i trafność koncepcji części eksperymentalnej programu pracy;
5. znajomość stanu wiedzy z dziedziny pracy, udokumentowaną 288 pozycjami cytowanej literatury, z okresu ostatnich lat;
6. poprawność metodologiczną planu i realizacji prowadzonych badań;
7. świadomość poziomu osiągniętych wyników i dalszych perspektyw pracy w podjętym temacie,

stwierdzam, że Pani mgr inż. Martyna Roszowskiej-Jarosz, spełnia w stopniu bardzo dobrym wymagania stawiane kandydatom do uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna, zgodnie z art. 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2022, poz. 574 z póź. zm.)

**W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Martyny Roszowskiej-Jarosz, do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**