

prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK
Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Inżynierii Mechanicznej
ul. gen. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Warszawa, dn. 29.12.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny BALCER

**pt. „Analiza właściwości mechanicznych termoplastycznych laminatów metalowo–
włóknistych zbrojonych tkaniną węglową wytwarzanych metodą prasowania na gorąco”**

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Pana dr. hab. inż. Łukasza Muślewskiego, prof. PBS nr 1/NB.250.5.2025 z dnia 5 listopada 2025 r.

1. Wstęp

Perspektywy rozwoju niektórych gałęzi przemysłu, w szczególności przemysłu samochodowego, lotniczego, morskiego czy zbrojeniowego są zdeterminowane między innymi przez rozwój technik wytwarzania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych. Obecnie w wielu rozwiązaniach, tam gdzie jest to możliwe, coraz częściej w miejsce stopów metali stosowane są materiały alternatywne, w tym materiały z grupy kompozytów, a dokładniej wszelkiego rodzaju materiały włókniste na bazie niektórych polimerów syntetycznych oraz kompozyty hybrydowe, powstające na przykład w wyniku połączenia różnych rodzajów składników, takich jak tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem węglowym (CFRP) i metale. Ma to na celu poprawę właściwości wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych przy jednoczesnym zmniejszeniu gęstości właściwej i pewnych właściwości niekorzystnych z punktu widzenia użytkowego w odniesieniu do tych, jakie posiadałyby ich poszczególne składniki. Obecnie kompozyty tego typu, w szczególności kompozyty na bazie aramidu, wykorzystywane są głównie do wytwarzania środków ochrony indywidualnej, jednak w niektórych ośrodkach naukowych prowadzone są również prace nad udoskonalaniem hybrydowych kompozytów wykorzystywanych na elementy konstrukcji w celu poprawienia ich właściwości wytrzymałościowych.

W świetle powyższego, podjęcie w recenzowanej pracy doktorskiej badań mających na celu poszerzenie wiedzy w zakresie wytwarzania i właściwości mechanicznych niektórych termoplastycznych laminatów metalowo włóknistych, uważam za w pełni uzasadnione.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Katarzyny Balcer składa się z 7 rozdziałów, wykazu literatury zawierającego bardzo liczną grupę 447 prac, na które Autorka powołała się w tekście oraz streszczeń rozprawy w języku polskim i angielskim zmykających opracowanie.

Praca na 202 stronach jest bogato ilustrowana rysunkami oraz fotografiami ze skaningowego mikroskopu elektronowego struktur wytworzonych kompozytów i ich przełomów oraz aparatury i stanowisk badawczych wykorzystywanych podczas badań własnych. Łącznie w rozprawie zamieszczono 68 rysunków i 62 tabel (numer tabeli 6.53 został użyty dwukrotnie). Opracowanie otwiera dwustronicowe *Wprowadzenie*, stanowiące pierwszy rozdział rozprawy, który poprzedzony został wykazem skrótów, symboli i jednostek stosowanych w pracy. W rozdziale tym Doktorantka w ujęciu retrospektywnym nakreśliła znaczenie rozwoju kompozytów polimerowych i hybrydowych laminatów metalowo-włóknistych FML (ang. fiber metal laminate), łączących w sobie właściwości metali i kompozytów polimerowych oraz nowszego rozwiązania termoplastycznych laminatów metalowo-włóknistych TFML (ang. thermoplastic fiber metal laminate), w których w miejsce żywic epoksydowych wprowadzono tworzywa termoplastyczne. Podkreśliła zarazem brak w dostępnej literaturze opracowań naukowych wypełniających w dostatecznym stopniu lukę w wiedzy dotyczącej w szczególności specyficznych właściwości mechanicznych oraz metod modelowania ich zachowania w warunkach osiowego rozciągania i podczas występowania obciążeń gnących.

W rozdziale drugim poświęconym analizie danych literaturowych, w sposób bardzo szczegółowy, w oparciu o 360 pozycji literaturowych Doktorantka dokonała przeglądu opracowań dotyczących stosowanych dotychczas kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami. Na podkreślenie zasługuje fakt, że aż 147 z przywołanych w tej części rozprawy publikacji ukazało się w ciągu ostatnich 5 lat. W zawartym na 36 stronach opisie Doktorantka skoncentrowała swoją uwagę między innymi na kompozytach FRP wzmacnianych tkaninami, wydzielając jednocześnie grupę kompozytów, w których osnowę stanowią polimery termoplastyczne. Z uwagi na nakreśloną w tytule rozprawy tematykę rozprawy, osobnej analizie poddane zostały wyniki badań opisanych w dostępnych publikacjach naukowych dotyczących laminatów metalowo-włóknistych z osnową termoutwardzalną lub termoplastyczną. Jeden z podrozdziałów poświęcono tematyce modelowania właściwości mechanicznych materiałów heterogenicznych, do których zaliczane są rozważane laminaty. Wydzielono trzy poziomy prowadzonych analiz w tym zakresie: mikroskalowy, mezoskalowy

i makroskalowy, uwzględniając stosowane najczęściej podejścia do modelowania: empiryczne, analityczne i numeryczne. Wśród modeli mikromechanicznych, stanowiących podstawę wstępnych analiz właściwości wytrzymałościowych kompozytów przedstawiono: podejścia Mori–Tanaka, regułę mieszanin i jej odmiany oraz model Hirscha. W modelach mezoskalowych, w których do opisu właściwości mechanicznych poszczególnych warstw wykorzystywane są wyliczone dla poszczególnych struktur wartości efektywne tychże właściwości, skoncentrowano się na: liniowym współczynniku objętościowej zawartości metalu MVF (ang. metal volume fraction) oraz klasycznej teorii laminowania CLT (ang. classical lamination theory). W opisie modeli makroskalowych odniesiono się przede wszystkim do globalnych odpowiedzi materiału na obciążenie, obserwowanych na krzywych naprężenie-odkształcenie, świadczących o inicjacji procesów uszkodzeń. Wynikom badań poświęconych mechanizmom uszkodzeń kompozytów zbrojonych tkaniną i laminatów włóknistych poświęcono kolejny podrozdział, w którym zidentyfikowano zarazem różne teorie i kryteria ich uszkodzenia. Analizę stanu wiedzy zamyka przegląd prac poświęconych symulacjom numerycznym procesu propagacji pęknięć i szacowaniu właściwości mechanicznych kompozytów wzmacnianych tkaniną oraz laminatów metalowo-włóknistych, zwracając szczególną uwagę na wyniki prac poświęconych modelowaniu uszkodzeń i modelowaniu adhezji między metalem a częścią kompozytową laminatów.

Przeprowadzona przez Doktorantkę z wyjątkową wnikliwością i starannością analiza literatury wykazała, że właściwości mechaniczne znajdujących się w jej kręgu zainteresowań laminatów metalowo-włóknistych z udziałem tworzyw termoplastycznych są wciąż słabo zbadane i wymagają dalszych analiz. W tym świetle, w rozdziale trzecim, przedstawione zostało uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy i sformułowanie podjętego problemu naukowego, który należy odczytać jako uzupełnienie wiedzy na temat wytwarzania i właściwości mechanicznych FML zbrojonych tkaniną węglową z termoplastyczną osnową polimerową, w tym przede wszystkim z osnową w postaci PBT. To legło u podstaw sprecyzowania tezy, celów rozprawy i programu badań. Doktorantka formułując tezę rozprawy założyła, że istnieje możliwość wytwarzania TFML na bazie stopu aluminium i tkaniny węglowej metodą prasowania na gorąco z zastosowaniem termoplastycznej osnowy polimerowej, przy czym TFML wykonywane z zastosowaniem PBT charakteryzują się porównywalnymi lub korzystniejszymi właściwościami mechanicznymi w stosunku do TFML wykonywanych z zastosowaniem osnowy z PA6.

Doświadczalny charakter rozprawy znalazł swoje odzwierciedlenie w sprecyzowanych celach rozprawy, których realizacja ma zaowocować:

- opracowaniem innowacyjnej technologii wytwarzania kompozytów termoplastycznych wzmocnionych tkaniną węglową oraz laminatów metalowo-włóknistych składających się z warstw tych kompozytów oraz arkuszy ze stopu aluminium z zastosowaniem metody prasowania na gorąco,
- analizą porównawczą właściwości mechanicznych laminatów TFML, zawierających jako fazę polimerową PBT oraz powszechnie stosowany PA6, zbrojonych tkaniną węglową o splocie skośnym,
- oceną przydatności PBT jako alternatywnej matrycy polimerowej w laminatach TFML, w kontekście uzyskania materiału o korzystnym stosunku właściwości mechanicznych do masy,
- opisem mechanizmów niszczenia opracowanych laminatów TFML.

Rozdział czwarty liczący 14 stron poświęcono opisowi programu i metodyki badań doświadczalnych i teoretycznych w zakresie modelowania analitycznego oraz numerycznego właściwości mechanicznych badanych materiałów, a także analizie statystycznej wyników tychże badań. W rozdziale tym dokonano szczegółowej identyfikacji konfiguracji zarówno przedmiotu badań w postaci materiałów bazowych, kompozytów CFRTP i laminatów FML, jak i zastosowanych podczas realizacji pracy licznych metod i technik badawczych. Bardzo szeroki zakres badań doświadczalnych obejmuje m.in.: badania gęstości laminatów, statyczne próby rozciągania zarówno materiałów bazowych, jak i opracowanych kompozytów termoplastycznych i laminatów, statyczne próby trójpunktowego zginania laminatów, analizy rozkładów odkształceń podczas badań wytrzymałościowych, ocenę degradacji modułu sprężystości wzdłużnej oraz analizę mikroskopową i mikrofraktograficzną przełomów badanych próbek. Do realizacji zaplanowanych, obszernych badań wykorzystano między innymi: stanowisko do pomiaru gęstości, maszynę wytrzymałościową INSTRON 5966, maszynę wytrzymałościową Zwick Roell Z010, system do cyfrowej korelacji obrazu DIC, mikroskop optyczny Keyence VHX-7000 oraz skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-6480LV. Symulacje statycznej próby rozciągania przeprowadzono w systemie Abaqus Standard, wykorzystując model MES odwzorowujący rzeczywistą geometrię próbek

Szczegółowy opis materiałów bazowych i procesu wytwarzania badanych polimerowych kompozytów termoplastycznych w postaci poliamidu PA6 i politereftalanu butylenu PBT wzmocnionych tkaniną węglową o splocie typu TWIL, a także opracowanych na bazie tychże kompozytów i arkuszy stopu aluminium AA6061 laminatów, zmieszczono w rozdziale piątym. Łącznie opracowano i wykonano 25 konfiguracji próbek różnego typu z materiałów bazowych,

kompozytów i laminatów o różnorodnej grubości i zróżnicowanych udziałach i orientacjach włókien tkaniny.

Zasadniczą część rozprawy stanowi rozdział szósty, zatytułowany *Wyniki badań i ich analiza*, liczący 91 stron. W pierwszej części tego rozdziału, obejmującej podrozdziały 6.1-6.4 zawarte zostały wyniki obszernych badań gęstości (podrozdział 6.1), właściwości wytrzymałościowych ustalonych na podstawie wykresów zależności naprężenia od odkształcenia w statycznej próbie rozciągania (podrozdział 6.2), rozkładów odkształceń (podrozdział 6.3) i wartości współczynnika Poissona (podrozdział 6.4) rejestrowanych podczas tych badań dla wcześniej zdefiniowanych materiałów bazowych, kompozytów CFRTP i laminatów TFML. Wskazano między innymi na wyraźnie większy przyrost, w odniesieniu do osnowy, udziału objętościowego włókien w przypadku kompozytów CFRTP z osnową PA6 w porównaniu z kompozytami na osnowie PBT oraz związek między gęstością i grubością wszystkich konfiguracji wytworzonych laminatów. Wyniki badań wytrzymałościowych w warunkach osiowego rozciągania przedstawiono w postaci wykresów zależności naprężenia od odkształcenia. Na tej podstawie określono i zestawiono w formie tabelarycznej, a także wykresów słupkowych liczny zbiór danych obejmujących: moduł sprężystości wzdłużnej, wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności oraz wydłużenie przy zerwaniu materiałów bazowych, kompozytów CFRTP i laminatów TFML. Podczas badań uwzględniono wpływ na uzyskane wyniki prędkości rozciągania, wprowadzenia zbrojenia z włókien węglowych do osnów o różnej grubości oraz orientację tkaniny wzmacniającej, a wyniki tych badań odniesiono do materiałów nieuzbrojonych w postaci jednorodnych polimerów PA6 i PBT. Głębsza analiza uzyskanych wyników wykazała, że rodzaj polimeru nie wywiera istotnego wpływu na moduł sprężystości wzdłużnej, wytrzymałość na rozciąganie oraz maksymalne odkształcenie kompozytów. Ukierunkowanie włókien w tkanych kompozytach ma natomiast istotny wpływ na wszystkie analizowane właściwości mechaniczne. Dowiedziono, że kompozyty z osnową PBT charakteryzują się wyższą granicą plastyczności, a więc większą zdolnością do przejmowania obciążeń przed wystąpieniem trwałych deformacji niż kompozyty z PA6. Wspólną cechą kompozytów, jednoznacznie warunkującą analizowane właściwości mechaniczne jest orientacja włókien. Badania wytrzymałościowe w warunkach osiowego rozciągania laminatów TFML poprzedzono badaniami materiałów bazowych oraz folii adhezyjnych. W świetle zamieszczonych w pracy wyników badań stwierdzono między innymi, że wśród materiałów bazowych najlepsze właściwości wytrzymałościowe uzyskano dla stopu aluminium AA6061. We wszystkich przypadkach wytworzonych laminatów zmniejszenie grubości polimeru z 3,5 do 2,5 mm skutkowało poprawą wartości zarówno modułu sprężystości

wzdłużnej właściwego, jak i wytrzymałości właściwej, a w przypadkach dwóch laminatów (A/PA6/0/25 i A/PBT/0/25) uzyskano wytrzymałość właściwą wyższą niż dla stopu aluminium. Dowiedziono tym samym zasadności łączenia kompozytów CFRTP z aluminium, przy czym ustalono, że efektywność przenoszenia obciążeń przez tego typu laminaty jest w dużej mierze uzależniona od jakości połączenia kompozytów z warstwami metalicznymi.

Oceny wpływu niejednorodności struktury na właściwości mechaniczne dokonano na podstawie zarejestrowanych za pomocą cyfrowej korelacji obrazu rozkładów odkształceń wzdłużnych i poprzecznych podczas statycznej próby rozciągania dla materiałów bazowych i laminatów. Stwierdzono że grubość próbek z kompozytu wzmocnionego tkaniną nie wpływa znacząco na ogólny, jednorodny charakter rozkładów odkształceń wzdłużnych, jednak w przypadku cieńszych próbek, o mniejszej zawartości matrycy polimerowej, bardziej uwidaczniają się pasma włókien ułożonych pod kątem $\pm 45^\circ$ w porównaniu z innymi orientacjami ich ułożenia. Podobną prawidłowość odnotowano również podczas analizy rozkładów odkształceń w próbkach z laminatów TFML. W tym przypadku odnotowano równomierny rozkład odkształceń wzdłużnych przy braku wzmocnienia polimeru oraz wyraźną niejednorodność rozkładu w przypadku warstw polimerowych zbrojonych tkaniną węglową, pomimo zastosowania warstw ze stopu aluminium. Jednocześnie w laminatach z warstwami PBT zaobserwowano większe lokalne odkształcenia niż w układach z PA6, co odnotowano również podczas badań tychże osnów. Wyniki pomiarów z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu umożliwiły również wyliczenie wartości współczynników Poissona dla poszczególnych materiałów. W przypadku badanych kompozytów wartość współczynnika Poissona zmieniała się wraz ze wzrostem obciążenia, przy czym przy małych obciążeniach była ona zbliżona do wartości ustalonej wcześniej dla osnowy polimerowej, a w kompozytach zbrojonych tkaniną była zależna od orientacji włókien wzmocnienia. Wyliczone wartości współczynnika Poissona, odbiegające od charakterystycznych dla materiałów jednorodnych, powiązano ze specyficzną budową tkaniny i rotacją włókien pod obciążeniem, prowadzącą do zamykania porowatej struktury i dużych odkształceń poprzecznych. W przypadku laminatów TFML uzyskane rozkłady odkształceń poprzecznych mają liniowy charakter liniowy, co przekłada się na stałą wartość współczynnika Poissona w zakresie poprzedzającym plastyczne odkształcenie. Ustalono, że zastosowanie warstw aluminiowych istotnie stabilizuje odkształcenia laminatów w porównaniu z zastosowanymi w nich kompozytami.

Drugą część rozdziału szóstego (podrozdział 6.5) poświęcono analizie teoretycznej obejmującej modelowanie analityczne i numeryczne właściwości mechanicznych w warunkach osiowego rozciągania kompozytów termoplastycznych wzmocnionych tkaniną węglową oraz

termoplastycznych laminatów metalowo–włóknistych z wyżej wymienionymi kompozytami i niewzmocnionymi polimerami. Do tego celu wykorzystano modele opisane wcześniej w podrozdziale 4.2.8, w tym wśród modeli analitycznych: regułę mieszanin (ROM), model Halpin-Tsai, metal volume fraction (MVF), klasyczną teorię laminowania (CLT) i metodę superpozycji. Wyniki uzyskane podczas obliczeń zostały porównane z rezultatami badań eksperymentalnych w celu oceny zgodności modeli z rzeczywistym zachowaniem materiałów. Podczas symulacji numerycznej statycznej próby rozciągania przeprowadzonej w środowisku Abaqus Standard, wykorzystano model MES odwzorowujący rzeczywistą geometrię próbki badanego materiału. Analiza porównawcza wyników badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych wykazała, że wyniki obliczeń znacząco przewyższają wartości modułu sprężystości wzdłużnej wyznaczone na drodze doświadczalnej, co uzasadniono przede wszystkim przyjętymi podczas obliczeń uproszczeniami, w tym między innymi pominięciem w modelu obecności folii adhezyjnych.

W kolejnej, trzeciej części rozdziału szóstego, do której zaliczyć należy podrozdziały 6.6 i 6.7, zamieszczono wyniki badań doświadczalnych materiałów bazowych, wytworzonych kompozytów CFRTP i laminatów TFML, mających na celu określenie wpływu obciążeń cyklicznych na skłonność do degradacji modułu sprężystości wzdłużnej badanych materiałów (podrozdział 6.6) oraz kompleksową ocenę właściwości mechanicznych i identyfikację mechanizmów zniszczenia w warunkach trójpunktowego zginania. W tym celu po kolejnych cyklach zmiany obciążenia wyznaczano, a następnie poddano analizie, zbiór uzyskanych wartości modułu sprężystości wzdłużnej. Obszerny materiał badawczy umożliwił między innymi opracowanie schematu degradacji modułu sprężystości wzdłużnej zarówno bazowych kompozytów w postaci zbrojonych tkaniną PA i PBT, jak i wytworzonych na ich bazie laminatów. Stwierdzono między innymi, że uzbrojenie $0/90^\circ$ wpływało najczęściej na zwiększenie modułu sprężystości wzdłużnej w kolejnych cyklach zmian obciążenia, natomiast orientacja $\pm 45^\circ$ zwykle prowadziła do spadku sztywności, szczególnie w kompozytach z osnową PBT. W laminatach również zaobserwowano ścisłe zależności między kierunkiem zbrojenia, rodzajem polimeru i zawartością warstwy kompozytowej, a skłonnością do degradacji, zwiększenia bądź stabilności modułu sprężystości wzdłużnej, na co istotny wpływ wywiera również kierunek przenoszenia obciążenia. Testy trójpunktowego zginania przeprowadzono jedynie na próbkach wyciętych z laminatów FML, a ich wyniki przedstawiono w postaci wykresów w układzie naprężenie–odkształcenie. Na tej podstawie, po opracowaniu statystycznym, wyznaczono właściwości wytrzymałościowe w postaci: modułu sprężystości przy zginaniu, wytrzymałości na zginanie i maksymalnego odkształcenia do zniszczenia.

Z analizy przedstawionych danych wynika istotny wpływ rodzaju zastosowanego polimeru oraz grubości kompozytu na moduł sprężystości przy zginaniu. Maksymalne odkształcenie do zniszczenia zależy w głównej mierze od układu i orientacji zastosowanego wzmocnienia. Wyniki badań w warunkach trójosiowego zginania odniesiono do wyników uzyskanych w warunkach osiowego rozciągania. Wykazano, że sztywność laminatów była z reguły wyższa podczas rozciągania, natomiast maksymalna wytrzymałość i odkształcenie do zniszczenia częściej osiągały większe wartości podczas zginania. Laminaty o mniejszej zawartości polimeru oraz te z udziałem PBT silniej reagowały wzrostem sztywności przy rozciąganiu, co wskazuje na ich większy potencjał zastosowań w elementach obciążanych osiowo. Z kolei laminaty o większej zawartości tworzywa oraz te z udziałem PA6 osiągały wyższe wartości wytrzymałości i odkształcenia podczas zginania niż podczas rozciągania, co czyni je korzystniejszymi w zastosowaniach konstrukcyjnych narażonych na obciążenia gnące.

Opis wyników badań zamyka podrozdział 6.8 zatytułowany *Charakterystyka uszkodzeń i przełomów*, w którym przedstawiono analizę mechanizmów uszkodzeń i morfologii przełomów po statycznych próbach wytrzymałościowych. Opisu mikrobudowy powierzchni przełomów dokonano na podstawie badań elektronooptycznych i trójwymiarowych map topografii przełomów kompozytów oraz laminatów poddanych osiowemu rozciąganiu, jak i laminatów poddanych trójpunktowemu zginaniu, uwzględniając wpływ rodzaju i udział osnowy polimerowej oraz rodzaj zbrojenia.

Opisane w pracy z należytą starannością wyniki badań doświadczalnych zapewniły możliwość obszernego wnioskowania, które Doktorantka przedstawiła w rozdziale 7 zatytułowanym *Podsumowanie*, w którym zamieszczono grupę szesnastu jednoznacznie brzmiących wniosków, wyciągniętych na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań. Sformułowane wnioski mają w głównej mierze wymiar użyteczny i podkreślają zarówno aktualność podjętej tematyki badawczej, nowatorski aspekt badań, jak i praktyczny wymiar ich wyników. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w jednym z podrozdziałów zamieszczono również planowane przez doktorantkę kierunki dalszych badań obejmujące zarówno zagadnienia związane z modyfikacjami opracowanych dotychczas kompozytów stosowanych w badanych laminatach TFML, jak i poszerzenie zakresu wytrzymałościowych badań statycznych o ścinanie i ściskanie, a także o badania zmęczeniowe i odporności na pękanie z uwzględnieniem wpływu warunków środowiskowych.

3. Ocena rozprawy

Kompozyty polimerowe znajdują coraz szersze zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, w szczególności w budownictwie, motoryzacji, lotnictwie i transporcie. Decydujące w tym przypadku są ich szczególne właściwości użytkowe, przede wszystkim relatywnie małe ciężar właściwy i wytrzymałość właściwa oraz satysfakcjonująca odporność na korozję. Czynniki te w wielu przypadkach skłaniają konstruktorów do rozważania zastosowania tego typu kompozytów w miejsce wykorzystywanych dotychczas stopów metali. Nowe możliwości w tym zakresie otwierają ciągle rozwijane procesy wytwarzania laminatów TFML na bazie stopu aluminium i tkaniny węglowej metodą prasowania na gorąco, z zastosowaniem termoplastycznej osnowy polimerowej. Prace poświęcone poszukiwaniom coraz lepszych, trwalszych i bardziej energooszczędnych rozwiązań tego typu skłaniają do podejmowania prób opracowania nowych lub zmodyfikowanych istniejących laminatów TFML. Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy intrygującego kierunku badawczego, obejmującego weryfikację wyników zastąpienia termoplastycznej osnowy polimerowej z PA6 materiałem alternatywnym. Wnikliwa analiza literaturowa aktualnych struktur tego typu w pełni uzasadnia wybór przez Doktorantkę PBT, jako osnowy kompozytu stanowiącego rdzeń poddanego badaniom laminatu TFML, co może prowadzić do uzyskania porównywalnych bądź korzystniejszych właściwości mechanicznych w odniesieniu do laminatów opartych na kompozycie o osnowie z PA6. Opracowując program badań własnych założono, że każda konfiguracja laminatu TFML, zależnie od rodzaju polimeru, orientacji tkaniny i jej udziału objętościowego, w praktyce tworzy odrębny materiał o zróżnicowanym zestawie właściwości mechanicznych. Reasumując, wypracowano generalny pogląd, że „... kryterium doboru polimeru w TFML powinno być odnoszone do oczekiwanych cech użytkowych oraz środowiska pracy. W tym kontekście PBT, ze względu na bardzo dobrą stabilność wymiarową, wysoką odporność chemiczną i przede wszystkim niską chłonność wilgoci, może być bardziej pożądanym składnikiem laminatu TFML w specyficznych zastosowaniach, nawet jeśli odbywa się to kosztem częściowej redukcji wybranych właściwości mechanicznych.”

Należy stwierdzić, że prezentowany w recenzowanej rozprawie doktorskiej opis zrealizowanych, w głównej mierze badań doświadczalnych pod względem merytorycznym zasługuje na bardzo dobrą ocenę i nie budzi istotnych zastrzeżeń. Nieliczne uwagi dotyczące obszaru merytorycznego rozprawy wynikają przede wszystkim z woli uściślenia niektórych zagadnień, mogących stanowić przyczynek do dyskusji podczas obrony recenzowanej rozprawy i dotyczących następujących problemów:

- 1) Bardzo szczegółowy opis mechanizmów zniszczenia badanych kompozytów i laminatów wskazuje na dominujący udział uszkodzeń międzywarstwowych w kierunku porzecznym (obserwowanych jako rozdzielenie lub delaminacja warstw) i ścinania, co wskazuje na słabe połączenie między warstwami. Jaka jest pewność, że zjawiska te nie są wynikiem błędów wytwórczych lub wpływu czynników zewnętrznych, np. wilgoci lub temperatury, co często prowadzi do pogorszenia wytrzymałości strukturalnej lub funkcjonalnej materiałów kompozytowych. Nie bez znaczenia ma w tym przypadku również zastosowana obróbka mechaniczna badanych próbek.
- 2) Jakie są możliwości zwiększenia adhezji między zastosowanymi w badanych kompozytach tkaninami węglowymi i polimerami oraz w laminatach - między tymi kompozytami i arkuszami stopu aluminium? W świetle opisanych wyników badań może to mieć znaczący wpływ na poprawę właściwości wytrzymałościowych.
- 3) W pracy nie podjęto próby nakreślenia obszarów wykorzystania w praktyce inżynierskiej uzyskanych wyników przeprowadzonych badań. Wnioski sformułowane na podstawie badań elementów modelowych w postaci próbek płaskich, czy to w warunkach osiowego rozciągania, czy podczas zginania, mogą nie stanowić wykładni w przypadku konieczności ukształtowania elementów o złożonej geometrii. Jakie są możliwości kształtowania określonych profili technikami formowania lub łączenia wytworzonych laminatów?

Pewne uwagi mogą również budzić nieliczne kwestie o mniejszym znaczeniu, natury edytorskiej, a dotyczące na przykład:

- zastosowania stylu potocznego, np.: „*Klasyczna teoria laminowania (CLT) bardzo dokładnie przewiduje sztywność, ...*” (str. 163²³⁻²⁴), „... *przyrost udziału objętościowego włókien w stosunku do czystej matrycy ...*” (str. 71¹⁻²),
- zakończenia podrozdziałów rysunkami (np.: rys. 2.7 – str. 33, rys. 2.11 – str. 37, rys. 4.8 – str. 52, rys. 4.12 – str. 59 oraz tabelami (np. Tabela 4.1 – str. 48 i Tabela 5.4 – str. 69), a także nadania takich samych tytułów tabelom: 6.50, 6.51 i 6.52,
- nieprecyzyjnego zapisu wyników badań, np. „... *słaba adhezja na granicy włókno-osnowa.*” (str. 164¹³⁻¹⁴), „... *głównym mechanizmem zniszczenia jest słaba adhezja na granicy włókno-osnowa ...*” (str. 164¹³⁻¹⁴),
- tzw. literówek, które sporadycznie pojawiają się w tekście, np.: „... *delaminacja.*” zamiast „... *delaminacji.*” (str. 28²³), „... *wytrzymałości ...*” zamiast „... *wytrzymałości ...*” (str. 162²³), „... *faktograficzne ...*” zamiast „... *fraktograficzne ...*”.

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy interpunkcyjne, które przekazano bezpośrednio Doktorantce do wykorzystania podczas przygotowywania kolejnych publikacji.

Przytoczone uwagi nie wpływają na ogólnie bardzo wysoką ocenę poziomu recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Doktorantka wykazała się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych oraz bardzo dużą wiedzą w zakresie projektowania, wytwarzania i badań właściwości mechanicznych kompozytów termoplastycznych oraz termoplastycznych laminatów metalowo-włóknistych, a do jej oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) Opracowanie i wykorzystanie w badanych laminatach technologii wytwarzania metodą prasowania na gorąco, umożliwiającej skuteczne wytwarzanie kompozytów termoplastycznych CFRTP wzmocnionych tkaniną węglową oraz laminatów TFML złożonych z naprzemiennych warstw aluminium i CFRTP.
- 2) Ustalenie zależności między ukierunkowaniem zbrojenia a właściwościami wytrzymałościowymi w warunkach osiowego rozciągania (modułem sprężystości, granicą plastyczności, wytrzymałością na rozciąganie i maksymalnym odkształceniem do zniszczenia) badanych kompozytów termoplastycznych wzmocnionych włóknem węglowym CFRTP i laminatów metalowo-włóknistych TFML.
- 3) Zbadanie wpływu udziału polimerowej osnowy na specyfikę właściwości wytrzymałościowych laminatów TFML wynikającą z niejednoznacznego przełożenia tego udziału na poprawę otrzymanych wyników. Na tej podstawie wysnuto wniosek, że wybór osnowy w rozpatrywanych strukturach może nie zależeć wyłącznie od jej właściwości wytrzymałościowych, ale od oczekiwanych cech użytkowych.
- 4) Opracowanie konfiguracji warstw badanych laminatów TFML zapewniającej wytrzymałość właściwą wyższą od stopu aluminium wykorzystanego na warstwy metaliczne, a także dowiedzenie homogenizującego wpływu tych warstw na wartość współczynnika Poissona laminatu.
- 5) Dokonanie weryfikacji rozkładów odkształceń badanych kompozytów w warunkach osiowego rozciągania, wywierających decydujący wpływ na mechanikę odkształcenia wytworzonych laminatów TFML i powiązanie ich z mikroarchitekturą zbrojenia.
- 6) Przeprowadzenie wielowariantowej oceny zmian sztywności kompozytów CFRTP i laminatów TFML w warunkach cyklicznych prób obciążania-odciążania, uwzględniającej orientację zbrojenia oraz rodzaj i zawartość termoplastycznej osnowy.

- 7) Dokonanie analizy porównawczej reakcji badanych laminatów TFML na różne rodzaje obciążeń, w szczególności na osiowe rozciąganie i trójpunktowe zginanie, umożliwiającej powiązanie rodzaju ich osnowy i struktury z obszarami praktycznych zastosowań, a także ustalenie przebiegu pęknięcia i mechanizmu ich niszczenia.

4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej powyżej oceny rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Balcer wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- Doktorantka posiada umiejętność zaprojektowania złożonych zadań naukowych i zagadnień praktycznych oraz ich realizacji nowoczesnymi metodami,
- podjęte w rozprawie trudne zadania zostały zrealizowane na bardzo wysokim poziomie,
- przeprowadzone analizy skomplikowanych zjawisk, opracowanie wyników i forma wniosków nie budzą zastrzeżeń,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktorantki w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że praca Pani mgr inż. Katarzyny Balcer pt.: *„Analiza właściwości mechanicznych termoplastycznych laminatów metalowo-włóknistych zbrojonych tkaniną węglową wytwarzanych metodą prasowania na gorąco”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązującej ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1551). Jednocześnie wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej o dopuszczenie Autorki do jej publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych badań, poziom naukowy oraz potencjał aplikacyjny rozprawy doktorskiej wnioskuję o jej wyróżnienie.

