

dr hab. inż. Jerzy Myalski, prof. nzw. Pol.Śl.
Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii
Instytut Nauki o Materiałach
Politechnika Śląska, Katowice

Katowice, 28.07.2016 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Majerskiego pt. „Wpływ temperatury na charakter zniszczenia i wybrane właściwości laminatów metalowo-włóknistych”

Recenzja opracowana na zlecenie Prodziekana ds. Nauki Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej dr hab. inż. Marka Szkodo, prof. ndzw. PG

Wybór tematyki rozprawy

Materiały kompozytowe stwarzają możliwość kształtowania właściwości poprzez odpowiedni dobór komponentów. Dzięki temu możliwe jest projektowanie i uzyskanie elementów konstrukcyjnych zależnych od ich przeznaczenia. Szczególnie wyraźnie widać to w przypadku konstrukcji kosmicznych czy lotniczych, w których materiały metalowe coraz częściej zastępowane są materiałami kompozytowymi. Przykładem są konstrukcje hybrydowych kompozytów przekładkowych składających się z warstw metalowych i kompozytów polimerowych umacnianych włóknami szklanymi, aramidowymi, węglowymi. Taki rodzaj połączenia w laminacie zapewnia nie tylko wysoką wytrzymałość właściwą i obniżenie masy kadłuba samolotu, ale również niezawodność i bezpieczeństwo. Decydują o tym takie cechy jak: bardzo dobra wytrzymałość zmęczeniowa, uderzalność, dobre właściwości korozyjne, niepalność, odporność na wyładowania atmosferyczne. Jednakże z uwagi na zróżnicowane właściwości stosowanych komponentów i warstwową budowę tego rodzaju laminatu, mogą pojawić się również niekorzystne cechy związane z procesami delaminacji pomiędzy poszczególnymi warstwami składowymi kompozytu hybrydowego.

W opiniowanej rozprawie Doktorant podjął się przeprowadzenia badań laminatów metalowo-włóknistych pozwalających na określenie mechanizmów zniszczenia oraz czynników istotnie wpływających na wytrzymałość w różnej temperaturze. Pomimo opracowania i zastosowania w technologiach wytwarzaniu kompozytów metalowo-włóknistych procedur pozwalających na uzyskanie zwiększenia adhezji pomiędzy warstwą metalu i polimerowego kompozytu włóknistego, prowadzone są nadal badania nad poprawą

jakości tego połączenia. Podjęta przez Doktoranta tematyka jest jak najbardziej aktualna i uzasadniona, a uzyskane wyniki badań mogą być wykorzystane do oceny i diagnostyki uszkodzeń w laminatach metalowo-włóknistych.

Charakterystyka rozprawy

Układ pracy jest zgodny z zasadami przyjętymi dla rozpraw doktorskich. Rozprawa doktorska zawiera 111 stron, składa się z 9 rozdziałów zasadniczych, spisu literatury oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Praca jest bogato ilustrowana rysunkami mikrostruktur ilustrujących w głównej mierze procesy dekohezji kompozytów, wynikami badań oraz stabelaryzowanymi danymi pomiarowymi (zawiera 72 rysunki i 7 tabel).

Niestety, praca zawiera wiele błędów edycyjnych. W szczególności odnosi się to do stosowania różnych oznaczeń materiałów do badań, używania potocznych, sloganowych pojęć, niejednoznaczności przyjętych określeń i nazw. W pracy pojawiają się zdania niedokończone, a w przypadku zdań podrzędnie złożonych, brak znaków interpunkcyjnych w znacznej mierze utrudnia zrozumienie intencji przekazu Autora. Wykaz zauważonych niedociągnięć przedstawiono w dalszej części opinii zatytułowanej „Uwagi szczegółowe”.

W pierwszych czterech rozdziałach przedstawiono aktualny stan wiedzy związany z problematyką pracy. W przeglądzie literaturowym zostały uwzględnione główne czynniki mające wpływ na właściwości laminatów. W rozdziale 1 przedstawiono budowę laminatów metalowo-włóknistych oraz określono rolę poszczególnych elementów ich struktury wpływającą na właściwości i użytkowanie tych materiałów. W rozdziałach 2 i 3 omówiono zagadnienia zmiany właściwości materiałów związane z oddziaływaniem środowiska (temperatura, wilgotność) oraz wadami technologicznymi (niejednorodność struktury, porowatość). Scharakteryzowano właściwości laminatów określanych skrótowo FML (Fibre Metal Laminate) pod wpływem różnego rodzaju obciążenia związanych z eksploatacją oraz wyszczególniono przyczyny i zjawiska powstawania uszkodzeń mogących mieć wpływ na procesy zniszczenia. W rozdziale 4 dokonano podsumowania wynikającego z przeglądu piśmiennictwa, uzasadniającego podjęcie badań związanych z wpływem temperatury na właściwości laminatów. Na podkreślenie zasługuje przedstawione w rozdziale 3 opracowanie własne, dokonane na podstawie zebranych danych literaturowych, ilustrujące zmianę wytrzymałości różnych grup komponentów oraz laminatów w funkcji temperatury. Opracowanie to pozwala na zobrazowanie zmian właściwości laminatów i ich komponentów jakie pojawiają się w przypadku konstrukcji lotniczych, gdzie materiał musi spełniać swoją funkcję zarówno w bardzo niskiej temperaturze panującej podczas lotu jaki i w czasie postoju,

w którym następuje nagrzewanie wywołane promieniowaniem słonecznym. W przeglądzie literaturowym w niewystarczającym stopniu przeanalizowano bardzo ważny problem związany wpływem granicy rozdziału pomiędzy komponentami na właściwości laminatów. Stwierdzono, że dobre połączenie pomiędzy kompozytem a metalem można uzyskać stosując procesy anodowania arkuszy metalowych. Taka obróbka pozwala na rozwinięcie powierzchni warstwy wierzchniej metalu, zapewniając dobre połączenie mechaniczne. W analizie pominięto zagadnienia związane z zwiększeniem wytrzymałości połączenia między metalem a kompozytem uzyskiwane poprzez nałożenie na powierzchnię metalu warstwy pośredniej zawierającej grupy funkcyjne, poprawiające zwilżalność oraz warunkujące utworzenie wiązań chemicznych pomiędzy komponentami. Wpływ wytrzymałości połączenia w przypadku omawianych materiałów kompozytowych jest bardzo ważny i może wpływać na uzyskanie pożądanych właściwości wytrzymałościowych. W przypadku obciążeń statycznych, korzystna jest duża wytrzymałość połączenia. Natomiast przy obciążeniach cyklicznych wytrzymałość na granicy metal-kompozyt powinna być mniejsza. Słabsze połączenie sprzyja w tym przypadku tworzeniu się pęknięć wzdłuż granicy rozdziału metal-kompozyt i skutkuje zmniejszeniem prędkości propagacji pęknięcia zmęczeniowego. Problemy związane z wpływem jakości powierzchni na wytrzymałość połączenia pomiędzy komponentami były również poruszane w pracach zespołu, którego Doktorant jest uczestnikiem, a wyniki tych prac w skromnym stopniu były uwzględnione w przeglądzie literaturowym.

Przeprowadzona analiza literaturowa świadczy o dobrej znajomości problematyki dotyczącej materiałów kompozytowych w zakresie najnowszych rozwiązań wykorzystujących laminaty FML, wykazuje wiedzę i przygotowanie Autora do prowadzenia badań oraz umiejętność analizowania wyników badań i ich interpretacji.

W rozdziale piątym „Badania własne” podano cel i zakres pracy oraz sformułowano tezę, której udowodnienie oparto na zaproponowanym zakresie badań.

Sformułowana przez Doktoranta teza pracy jest niejednoznaczna. Jej brzmienie „Analiza właściwości i charakteru zniszczenia pozwala na identyfikację czynników krytycznych, warunkujących odporność laminatów FML na obniżoną i podwyższoną temperaturę” sugeruje, że proces zniszczenia struktury laminatu ma określone właściwości - jakie?. Powinna raczej dotyczyć zmian właściwości komponentów i laminatów spowodowanych oddziaływaniem temperatury, z wyszczególnieniem jakie czynniki krytyczne mogą być dominujące w procesie zniszczenia laminatu.

W kolejnym rozdziale przedstawiono program przyjętych badań, charakterystykę użytych materiałów i metodykę badań. Przyjęta metodyka badawcza miała pozwolić na ocenę

zmian właściwości mechanicznych komponentów i laminatów metalowo-włóknistych na podstawie badań wytrzymałości na rozciąganie w temperaturze 153K, 223K, 293K i 358K, badań współczynnika tłumienia oraz modułu sprężystości metodą analizy termomechanicznej DMA, zmian wytrzymałości połączenia pomiędzy komponentami laminatów wywołanymi ekspozycją w temperaturze 453K przez 3-91 dni.

W celu określenia różnic zachodzących w mechanizmach zniszczenia, związanych z temperaturą i oddziaływaniem środowiska, przeprowadzano jakościową analizę fraktograficzną przełomów laminatów po badaniach w temperaturze 153K i 293K oraz analizę stanu powierzchni rozdziału komponentów w zniszczonych złączach po procesie starzenia.

W rozdziale 7 przedstawiono uzyskane wyniki badań, przeprowadzono ich analizę, pozwalającą na sformułowanie zawartych w rozdziale 8 wniosków.

Za osiągnięcie Doktoranta o charakterze technologicznym, należy uznać zaprojektowanie i wytworzenie laminatów do badań. W badaniach wykorzystano 15 grup laminatów składających się z dwóch rodzajów warstw metalowych ze stopów aluminium i tytanu oraz dwóch rodzajów kompozytów włóknistych umacnianych włóknami szklanymi i węglowymi, o zróżnicowanych kierunkach ułożenia włókien 0° , 90° i 45° w warstwach kompozytowych. Przy opisie oznaczeniu próbek do badań należałoby sprecyzować, z ilu warstw składa się kompozyt oznaczony jako AlG i AlC z orientacją [0]. Jeśli dla wymienionych kompozytów będziemy mieli do czynienia tylko z jedną warstwą, a nie jak to prawdopodobnie ma miejsce, z dwoma o orientacji [0,0], porównanie mechanizmów zniszczenia z grupami kompozytów o orientacji [0,90] i $[\pm 45]$ może być utrudnione. W przypadku dwóch warstw kompozytu podczas zniszczenia może pojawić się dodatkowa powierzchnia rozdziału związana z oddziaływaniem między poszczególnymi warstwami kompozytu.

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie zarówno materiałów komponentów oraz laminatów o różnej konfiguracji i ilości poszczególnych warstw, przeprowadzone w zakresie temperatury od 153K - 358K ($-120 \div 110^\circ\text{C}$), pozwoliły na zaproponowanie do prognozowania właściwości kompozytów współczynnika MFV, określającego udział objętościowy metalu w laminacie. Różnica pomiędzy danymi pomiarowymi i wyznaczonymi teoretyczne była niezauważalna. Można zatem dzięki temu wskaźnikowi wyznaczyć wytrzymałość laminatu metalowo-włóknistego w funkcji temperatury na podstawie danych pomiarowych komponentów laminatu oraz udziału objętościowego warstw metalowych. Próbkę po wykonaniu badań poddano obserwacjom makroskopowym i mikrostrukturalnym z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego. Pozwoliło to na jakościową ilustrację różnic

zachodzących w procesach zniszczenia w temperaturze otoczenia i temperaturze obniżonej (153K). Porównanie zostało dokonane tylko dla laminatów składających się z warstw kompozytów umacnianych włóknami węglowymi i szklanymi z zewnętrznymi warstwami aluminiowymi. Obserwacja makroskopowa przełomów pozwoliła stwierdzić, że w niskiej temperaturze zmniejsza się odkształcenie plastyczne w metalowych, zewnętrznych warstwach oraz w mniejszym stopniu widoczne są procesy zniszczenia międzywarstwowego pomiędzy komponentami. Wygląd próbek po badaniach, potwierdził także korzystną cechę laminatów typu metal-kompozyt, a mianowicie brak przełomów rozdzielczych. Zniszczenie następuje tylko w warstwach kompozytu oraz na granicy rozdziału komponentów, bez dekohezji zewnętrznych warstw aluminiowych. Charakter zniszczenia w warstwach kompozytowych zależy głównie od kierunku ułożenia i rodzaju zastosowanych włókien. Słabsze niż w przypadku kompozytu z włóknem węglowym, połączenie na granicy włókno szklane-żywica epoksydowa, powoduje inny przebieg zniszczenia. Dyskusyjny jest komentarz związany z opisem procesów zniszczenia kompozytów z włóknem szklanym, dotyczący sformułowania „warstwa kompozytowa została podzielona przez liczne przełomy powstałe poprzecznie oraz równoległe do kierunku ułożenia włókien”. W takim przypadku, przełom powstaje na skutek propagacji mikroszczelin w osnowie. Słabe połączenie na granicy rozdziału powoduje zmianę kierunku propagacji szczeliny i tworzenie się szczelin odwarstwiających włókno od osnowy. Kiedy szczelina odwarstwi włókno na większej długości, następuje jego zniszczenie. Następnie mikroszczelina ponownie zmienia kierunek propagacji i może dalej propagować w osnowie, aż do kolejnego włókna. W wyniku tego tworzy się przełom o bardzo rozwiniętej powierzchni, wielopłaszczyznowy, w którym można zaobserwować wyciągnięte z osnowy włókna.

Wyjaśnienia wymaga stwierdzenie dotyczące odkształcenia plastycznego osnowy w temperaturze otoczenia. Oceny stopnia odkształcenia osnowy dokonano na podstawie wielkości obszarów niezniszczonej osnowy (tzw. płatki osnowy) oraz ilości pęknięć. Zarówno w temperaturze 153K i 293K osnowa występuje w stanie szklistym, któremu towarzyszą odkształcenia sprężyste różniące się wartością, a zatem jak należy wytłumaczyć pojawienie się odkształcenia plastycznego.

Bardzo ważne z punktu widzenia wpływu temperatury na właściwości laminatów i kompozytów wyniki badań termicznej analizy mechanicznej DMA wymagają uzupełnienia. W szczególności dotyczy to badań właściwości komponentów i laminatu zawierającego włókno węglowe. Podano, że temperatura zeszklenia wynosi 195°C (468K), a badanie zakończono w temperaturze 200°C (473K). Jednak zmiana zarówno modułu zespolonego

i wartości współczynnika tłumienia, przedstawiona na rys. 45, 46 i 48 wskazuje, że wartości temperatury zeszklenia mogą być większe.

W przypadku badań wytrzymałości złącz różnych komponentów laminatu, odzwierciedlających wpływ środowiska na mechanizm zniszczenia, należałoby wyszczególnić jakie są kierunki ułożenia warstw kompozytu w złączu klejonym i czy łączono jedną warstwę czy dwie warstwy kompozytu z metalem. Niejednoznaczne jest w tym przypadku oznaczenie przyjęte dla próbek umacnianych włóknem węglowym i szklanym o kierunku ułożenia włókien w warstwie oznaczone jako $[\pm 45]$, wskazujące że połączono dwie warstwy kompozytowe z metalem.

Na podstawie mikrostruktury powierzchni przełomów złącz klejonych wykazano, że o zniszczeniu decyduje głównie zniszczenie na granicy rozdziału metal kompozyt. Zniszczenie ma charakter adhezyjny albo adhezyjno-kohezyjny. W przypadku zniszczenia o charakterze adhezyjnym dochodzi do zniszczenia pomiędzy poszczególnymi warstwami komponentów. Natomiast w przypadku połączenia adhezyjno-kohezyjnego następuje głównie zniszczenie w kompozycie oraz na granicy metal-warstwa anodowana. Potwierdzeniem tworzenia delaminacji ma być obecność fragmentów warstwy anodowanej na powierzchni kompozytu. Jednakże wnioskowanie, oparte jedynie na podstawie obserwacji mikrostruktury powierzchni przełomu złącza, może być może być mylące. Należałoby dokonać również fazowej analizy rentgenowskiej warstw widocznych na powierzchni kompozytu. Na ich podstawie można by jednoznacznie stwierdzić, która z granic rozdziału powoduje delaminację i czy jej zniszczenie następuje na granicy metal-warstwa anodowana, warstwa anodowana-polimer zwiększający adhezję (tzn. primer) czy też następuje zniszczenie pomiędzy polimerem a żywicą osnowy kompozytu.

Przedstawione podsumowanie i wnioski są bardzo ogólne. Większość z nich dotyczy zmiany właściwości laminatów i komponentów w funkcji temperatury. Końcowy wniosek uzasadniający podjętą tematykę badawczą, a dotyczący zmiany mechanizmu zniszczenia w zależności od kąta ułożenia włókien w warstwie kompozytowej jest niejednoznaczny. Odnosi się to do stwierdzenia, że w przypadku ułożenia warstw kompozytowych w układzie $[0,90]$ mamy do czynienia z „mieszaną formą” zniszczenia, czyli nakładaniem się mechanizmów zniszczenia występujących w laminatach o ułożenia włókien w kierunkach $[0]$ i $[\pm 45]$.

Zaprezentowane w tabelach 6 i 7 zestawienia właściwości komponentów i laminatów oraz kryteria oceny odporności zostały oparte zarówno na podstawie badań własnych jak i informacji literaturowych. Powinny w większym stopniu dotyczyć wyszczególnienia jak

skład fazowy laminatu, rodzaj zastosowanych komponentów, budowa i geometria ułożenia włókien, może decydować o mechanizmie zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych. Niektóre z tych kryteriów, takie jak naprężenia własne, czy procesy związane z degradacją osnowy, zostały przedstawione w analizie literaturowej i w niewielkim stopniu omówione w wynikach badań własnych.

W analizie należałoby wymienić kryteria pozwalające na ocenę mechanizmów zniszczenia. Pozwoliłoby to na jakościowy opis mechanizmów zniszczenia laminatów, porównanie i weryfikację informacji zawartych w literaturze oraz zaproponowanie nowych kryteriów oceny procesów dekohezji złożonych struktur kompozytów hybrydowych. Przyczyniłoby się to również do poszerzenia wiedzy oraz bazy danych o właściwościach laminatów, ułatwiło projektowanie i dobór nowych materiałów komponentów wykorzystywanych w konstrukcjach lotniczych.

Uwagi szczegółowe

str. 13 ¹² – niejasne sformułowanie „odpornością na obciążenia w postaci ścinania”,

str. 23 ^{2,3,8} – komentarz do rys. 5 jest niejasny, co oznacza sformułowanie: „przełom kruchy z dużą ilością podłużnych żłebów ujawniających kierunki propagacji pęknięcia niszczącego”, oraz zdanie kolejne: „Nieliczne występowanie pęknięć prostopadłych do głównej płaszczyzny przełomu”, a także stwierdzenie, że zerwanie połączenia na granicy rozdziału włókno-osnowa związane jest z dyssypacją energii,

str. 25 ³ – niejasne sformułowanie „pękanie osnowy oraz przestrzeni na granicy rozdziału włókno-osnowa,

str. 27 ¹¹ – niejasne zbyt złożone zdanie, dotyczące przyczyn delaminacji. Wymieniono w nim występujące najczęściej rodzaje uszkodzeń prowadzące do delaminacji takie jak wyboczenie, lub odrywanie warstw laminatu oraz „obciążenie udarowe”.

str. 28 ⁴ – komentarz do rys. 11 odnosi się tylko do propagacji zniszczenia kompozytu przy obciążeniach cyklicznych,

str. 29 ⁵ – co oznacza stwierdzenie, że w temperaturze podwyższonej osnowa jest: „podatna na rolowanie pod wpływem przyłożonego obciążenia”,

str. 33 – należałoby zastosować te same oznaczenia dotyczące komponentów, w tekście oraz legendzie rysunku 15,

str. 35 ⁹ – wyjaśnić komentarz odnoszący się do rys. 15: „kompozyt węglowo-epoksydowy charakteryzuje się spadkiem wytrzymałości na rozciąganie zarówno dla temperatur podwyższonych jak i obniżonych”, dane przedstawione na rysunku 16 dotyczącym porównania wartości modułów Younga, świadczą o tym, że kompozyt węglowo-epoksydowy ma większą wartość modułu sprężystości w niskiej temperaturze niż w temperaturze otoczenia,

str. 37⁸ – niezbyt precyzyjne sformułowanie związane z lokalnym plasyfikowaniem osnowy w wyniku „koncentracji dyfundujących molekuł w tych obszarach”.

str. 45 – tytuł podrozdziału 6.3 powinien zostać zmieniony, z uwzględnieniem zawartej w nim treści. Dotyczy on zarówno metodyki badań, ale także technologii wytwarzania laminatów metalowo-włóknistych,

str. 46 – przy opisie parametrów wytwarzania, ciśnienie wyrażone w MPa nie powinno mieć wartości ujemnej,

str. 46 – brak oznaczeń dotyczących sposobu przygotowania powierzchni arkuszy metalowych, jakie znajdują się w tabeli 4 na str. 52,

str. 47⁴ – podano, że badania były realizowane w temperaturze 385K, natomiast w tabeli 5 (str. 53) i w dalszej części analizy wyników badań temperatura wynosi 358K,

str. 49⁵ – należałoby uzasadnić dobór temperatury, w której przeprowadzono klimatyzację złącz. W opisie metodyki badań przyjęto, że jest to temperatura 423K (150°C) o 5 deg niższa niż temperatura zeszklenia żywicy M12. Wg dostępnych danych katalogowych producenta dla żywicy M12 temperatura zeszklenia wynosi 410K (137 °C), a żywicy M21 448K (175 °C),

str. 50¹⁵ – zastąpić zwrot „względem temperatury” „w temperaturze”, podobnie na stronie 52²,

str. 50¹⁰ – niewłaściwie przytoczona pozycja literaturowa [41],

str. 50², str. 52⁴, str. 57⁹ – co oznacza określenie „niepewność danych pomiarowy”,

str. 54⁸, rys. 21, str. 55, rys. 22 – temperatura badania wytrzymałości na rozciąganie wynosi 153K, natomiast w legendzie podano 193K ,

str. 55⁹ – niejasne sformułowanie „cała sztywność jest zapewniana przez warstwę kompozytową”,

str. 55² – co oznaczają „parametry krzywych”,

str. 61⁸ – zdanie niepoprawne, jak należy interpretować stwierdzenie, że mamy do czynienia z „wartościami wypadkowymi dla właściwości kompozytu i metalu z niewielkim wpływem czynnika zewnętrznego w postaci temperatury”,

str. 62⁵ – niejasne określenie dotyczące przełomów poprzecznych i podłużnych,

str. 64⁶ – należy wyjaśnić komentarz dotyczący przełomu przedstawionego na rys. 32e. Na rysunku widać warstwę metalu znajdującą się pomiędzy warstwami kompozytowymi. Wydaje się to niemożliwe, gdyż w analizowanym przełomie laminatu AlG 2/1 włókna umiejscowione są na zewnętrznych stronach blachy aluminiowej,

str. 66¹ – czy nie dało by się zdefiniować i wyznaczyć wartości, jak podano „gęstości pęknięć”, np. poprzez podanie ilości pęknięć przypadającej na określoną długość,

str. 66¹, str. 70⁷ – czy w tych przypadkach chodzi o dyssypację energii czy raczej powinno dotyczyć uwalniania energii,

str. 67³ – prawdopodobnie chodzi o porównanie laminatu AlG [0] z laminatem AlG [0 90],

str. 69⁴ – zdanie niejasne, wynika z niego że ilość pęknięć w osnowie kompozytu może mieć wpływ na zniszczenie warstwy metalowej laminatu,

str. 71² – zdanie niejasne, co oznacza sformułowanie „Zakończenia włókien układają się w obszary o dość gładkich powierzchniach”,

str. 71⁴ – niedokończone zdanie,
str. 72³ – zdanie niejasne, o jakie kierunki ułożenia włókien chodzi?,
str. 73³ – trudno się zgodzić z komentarzem do rys.40 dotyczącym pęknięć w osnowie, z uwagi na zbyt małe powiększenie,
str. 73⁵ – porównanie mikrofotografii przełomów zniszczenia laminatów AIC przedstawione na rys.40, z przełomem laminatu AIG (rys. 34) wydaje się nieuzasadnione,
str. 75⁴ – niejasne sformułowanie dotyczące udziału tzw. „odkształceń trwałych”,
str. 79⁴ – zdanie niejasne z którego wynika, że poprawę właściwości w podwyższonej i obniżonej temperaturze można uzyskać poprzez podwyższenie temperatury zeszklenia,
str. 81⁵ – w jaki sposób dokonano pomiarów „podczas przebiegu sezonowania oraz po sezonowaniu”,
str. 83 - 84 – brak opisu osi na rysunkach 53-56.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Majerskiego porusza bardzo ważne, w niewystarczającym stopniu opisywane zagadnienia dotyczące wpływu środowiska na właściwości mechaniczne i dekohezję kompozytów hybrydowych jakimi są laminaty metalowo-włókniste. Należy potraktować rozprawę jako pierwszą próbę analizy procesu zniszczenia laminatów metalowowłóknistych wykonaną przez Autora, dającą podstawę do rozwijania i prowadzenia dalszych prac badawczych. Zawarte w pracy porównanie efektów towarzyszących zniszczeniu różnych laminatów oraz ich komponentów w zależności od rodzaju materiału, kierunku ułożenia warstw włókien ma charakter zarówno poznawczy jak i technologiczny, przydatny do opracowania nowych rozwiązań materiałowych oraz w diagnostyce wykrywania uszkodzeń.

Doktorant na podstawie analizy literaturowej wykazał się wiedzą pozwalającą na zdefiniowanie problemu oraz umiejętnością realizacji szeroko zaplanowanych trudnych prac technologicznych i badawczych.

Doktorant nie ustrzegł się błędów edycyjnych, których prawdopodobną przyczyną był pośpiech w trakcie redagowania, w dużej mierze obniżający wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Majerskiego może stanowić podstawę do dopuszczenia jej do publicznej obrony, podczas której Doktorant powinien między innymi udzielić odpowiedzi na zawarte w opinii uwagi merytoryczne i szczegółowe.

