

Prof. dr hab. inż. Tomasz Kubiak
Politechnika Łódzka
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji
90-924 Łódź, Stefanowskiego 1/15

Łódź, 22 listopada 2018



RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ :
mgr inż. Konrada Dadeja

„Wpływ konfiguracji warstw laminatu metal-kompozyt na odporność zmęczeniową”

1. Podstawa opracowania oceny

Niniejszą ocenę rozprawy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Barbary Surowskiej opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Patera z dnia 31 października 2018 r.

2. Treść pracy

Nowoczesne materiały inżynierskie projektowane na potrzeby konkretnej konstrukcji ze znanymi kierunkami obciążeń znajdują coraz szersze zastosowanie prawie we wszystkich gałęziach przemysłu. Historia pokazuje, że najnowsze i najbardziej kosztowne rozwiązania rozwijane są najpierw na potrzeby przemysłu kosmicznego, potem lotniczego i na końcu, gdy opracowane zostaną tańsze technologie rozwiązania trafiają do innych gałęzi przemysłu. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku laminatów metal – kompozyt. Najpopularniejszy z nich to laminat łączący aluminium z warstwami kompozytowymi GFRP (włókno szklane w żywicy epoksydowej) tzw. GLARE, który został wymyślony w latach 70 w Delft University i opatentowane w 1987 r, a obecnie jest stosowany w lotnictwie. Inne znane z literatury typy laminatów FML zależą od zastosowanych materiałów na poszczególne warstwy. Naukowcy podejmowali skuteczne próby zastąpienia aluminium przez tytan, a kompozyt z włóknami szklanymi – kompozytem z włóknami węglowymi (CARALL) lub aramidowymi (ARALL). W ten sposób powstało wiele nowych laminatów o różnych właściwościach, które wymagają również nowych metod badań doświadczalnych oraz nowych modeli analitycznych, analityczno-numerycznych czy numerycznych do analizy ich zachowań.

Mgr inż. Konrad Dadej podjął się opracowania analitycznej metody wyznaczania wytrzymałości na rozciągania oraz wytrzymałości zmęczeniowej kompozytów metalowo-włóknistych. Opracowany model wyznaczania właściwości laminatu bazuje na znajomości właściwości materiałów poszczególnych warstw. Podstawy teoretyczne modelu opierają się o mechanikę kompozytów, a w szczególności na klasycznej teorii cienkich płyt (CPT lub w tym wypadku CLT - klasyczna teoria laminatów). Zaproponowany przez Doktoranta model analityczny uwzględnia sprężysto-plastyczny charakter warstwy metalowej oraz naprężenia wstępne (resztkowe), które są wynikiem procesu wytwarzania laminatów.

Do szacowania odporności zmęczeniowej wykorzystano opracowaną przez Homana metodę wyznaczania naprężeń cieplnych powstałych w procesie autoklawowym, rozszerzając ją

o sprężysto-plastyczny model Ramberga-Osgooda dla aluminium. Znajomość stanu naprężeń wynikających z obciążenia termicznego (chłodzenie po procesie utwardzania) oraz mechanicznego (obciążenie robocze) była podstawą do opracowania analitycznej metody wyznaczania krzywych S-N z uwzględnieniem możliwości przenoszenia obciążenia po zniszczeniu jednej z warstw. Zaproponowana metoda w całości, jak i jej poszczególne etapy były walidowane wynikami obliczeń numerycznych MES i badań eksperymentalnych.

Opracowaną metodę wykorzystano do analizy wpływu konfiguracji warstw laminatu metalowo-włóknistego na jego wytrzymałość zmęczeniową. Doktorant rozważył cztery następujące układy laminatów: aluminium – kompozyt węglowy, aluminium - kompozyt szklany, połączenie aluminium z kompozytami węglowymi i szklanymi (dwa laminaty o różnych współczynnikach MVF).

Rozprawa doktorska napisana została na 172 stronach, składa się z 20 rozdziałów, dwóch załączników, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu ważniejszych oznaczeń i symboli oraz spisu literatury zawierającego 168 pozycji.

Układ pracy przypomina prace brytyjskie, w których połowa pracy to przegląd najnowszej literatury i przybliżenie podstawowych teorii wykorzystanych do rozwiązania zagadnienia prezentowanego w rozprawie.

W rozdziale pierwszym Autor przybliżył temat pracy, wyjaśnił zasadność jego podjęcia oraz opisał właściwości, zalety oraz zastosowanie laminatów metalowo-włóknistych o różnych konfiguracjach warstw, w tym prowadzących do hybrydyzacji.

Rozdział drugi stanowi rys historyczny powstania, zastosowania i rozwoju laminatów typu FML w odniesieniu do wytrzymałości zmęczeniowej.

Rozdziały od trzeciego do siódmego przedstawiają podstawy teoretyczne dotyczące: charakterystyki laminatów metalowo-włóknistych (rozdział 3), podstaw mechaniki laminatów (rozdział 4), metod modelowania numerycznego kompozytów (rozdział 5), wytrzymałości zmęczeniowej laminatów (rozdział 6), oraz metod modelowania zjawisk zmęczeniowych (rozdział 7).

Doktorant w rozdziale ósmym podsumował stan wiedzy związany z podjętą tematyką, wskazując jakie elementy nie były dotychczas rozpatrywane, brane pod uwagę czy uwzględniane w dotychczasowych rozważaniach, analizach czy modelach. Autor rozprawy zwrócił uwagę na fakt, że:

- klasyczną teorię cienkich płyt stosować można jedynie do zagadnień liniowo sprężystych, co powoduje brak możliwości opisu zachowania aluminium powyżej granicy proporcjonalności;
- w literaturze światowej okres pracy laminatu zwanym „szczątkową wytrzymałością zmęczeniową laminatów FML” jest dotychczas mało rozpoznany, pomijany lub traktowany marginalnie.

W rozdziale dziewiątym Autor zapoznał czytelnika z postawionym do rozwiązania problemem naukowym, polegającym na określeniu wpływu konfiguracji warstw laminatów FML na ich odporność zmęczeniową. W celu określenia ww. wpływu Doktorat wskazał na konieczność:

- opracowania analitycznej metody wyznaczania naprężeń w laminacie FML obciążonym cieplnie i mechanicznie z uwzględnieniem zakresu plastycznego warstw metalowych;
- opracowania metody przewidywania wytrzymałości zmęczeniowej laminatów FML na poziomie pojedynczej laminy.

Kolejny, dziesiąty rozdział to zakres prac niezbędnych do osiągnięcia celu i rozwiązania postawionego problemu naukowego.

Rozdział jedenasty przybliży przedmiot badań i zastosowaną metodykę badawczą.

Rozdziały od dwunastego do osiemnastego przedstawiają zaproponowane modele analityczne w zakresie naprężeń cieplnych i mechanicznych, modelowania krzywych S-N oraz

analizy szcztątkowej wytrzymałości zmęczeniowej. W rozdziałach tych przedstawiane są wyniki obliczeń walidowane wynikami analiz numerycznych MES lub wynikami badań doświadczalnych. W podsumowaniu każdego rozdziału znajdują się odniesienia do prac innych autorów, wskazując co nowego w odniesieniu do nich wnoszą uzyskane wyniki.

Autor rozprawy w rozdziale dziewiętnastym podsumował wyniki swojej pracy, a w rozdziale dwudziestym w sposób syntetyczny przedstawił wnioski wynikające z otrzymanych wyników analiz.

Dodatkowo w załączniku A zawarte zostały wyniki badań doświadczalnych, a załącznik B to analiza wpływu przyjętego modelu konstytutywnego (jednokierunkowy stan naprężeń, płaski stan naprężeń) na wyniki obliczeń – rozpatrzono wpływ różnorodności liczb Poissona oraz współczynników rozszerzalności cieplnej poszczególnych warstw na powstawanie naprężeń w kierunku poprzecznym do kierunku obciążania próbek.

3. Ocena pracy

Mgr inż. Konrad Dadej podjął się rozwiązania ważnego problemu badawczego, dotyczącego aktualnej tematyki badawczej. Zaproponowanie modelu analitycznego do analizy wpływu ułożenia warstw w laminacie typu FML na jego trwałość zmęczeniową ma charakter użyteczny i wpisuje się w dzisiejsze trendy badań i projektowania laminatów.

Lektura przedstawionej ponownie do oceny pracy doktorskiej pozwala stwierdzić, że niedociągnięcia pierwszej wersji zostały usunięte. Doktorant porównał stan naprężeń wynikający z obciążeń cieplnych i mechanicznych przy założeniu zarówno jednokierunkowego stanu naprężeń jak i płaskiego stanu naprężeń. Ponadto dokonał analizy wpływu różnej wartości liczby Poissona i współczynnika rozszerzalności cieplnej każdej z warstw na generowane naprężenia w dwu prostopadłych kierunkach. Przedstawione w pracy porównanie stanowi dowód, że przyjęcie modelu fizycznego w postaci jednokierunkowego stanu naprężeń dla laminatów FML z warstwami kompozytowymi o ułożeniu włókien tylko wzdłuż kierunku obciążenia mechanicznego może być zastosowane, a różnice w szacowaniu naprężeń są nie większe niż 3%.

Stwierdzono, że zauważone w poprzedniej wersji pracy liczne błędy, w tym merytoryczne, również zostały usunięte. Pewien niedosyt budzi przywiązanie Autora do stwierdzenia „metoda CPT”, którego nie udało się całkowicie usunąć z treści pracy – CPT jest teorią opisującą zachowanie się cienkich płyt pod obciążeniem i została ona jedynie zaimplementowana do metody szacowania naprężeń cieplno-mechanicznych zaproponowanej przez Doktoranta.

Na szczególną pozytywną uwagę zasługuje:

- zaproponowany bezwymiarowy potencjał odporności zmęczeniowej laminatu FML, który z powodzeniem można zastosować do oceny wpływu struktury laminatu na jego wytrzymałość zmęczeniową;
- zaproponowany podział krzywych S-N dla laminatów metalowo-włóknistych ze względu na sposób zniszczenia (rys. 15.36 na str. 124);
- zastosowanie modelu Kohouta i Vecheta, tj. jednego równania opisującego zależność S-N dla wszystkich jej zakresów;
- umożliwienie wyznaczania zakresu szcztątkowej wytrzymałości zmęczeniowej poprzez prognozowanie zniszczenia laminatu w oparciu o analizę zniszczenia zmęczeniowego każdej warstwy.

3.1. Uwagi ogólne

Układ pracy jest poprawny, gdyż najpierw autor przedstawia stan wiedzy, potem formuje problem naukowy i cele badawcze a następnie przedstawia wyniki badań. Sposób podziału pracy przypomina nieco wersje brytyjskie prac, gdyż stosunkowo duża jej część poświęcona jest powszechnie znanej, książkowej wiedzy z zakresu mechaniki kompozytów i wytrzymałości zmęczeniowej, która wykorzystana została przy budowie modeli analitycznych.

W ocenie recenzenta w pracy nadal brak jest jednego rozdziału przedstawiającego w sposób skondensowany aktualny stan wiedzy (doniesienia ostatnich 10 lat) dotyczącej laminatów FML w aspekcie modelowania i analizy stanu naprężeniowo-odkształceniowego i szacowania trwałości poprzez analityczne wyznaczanie krzywych SN dla laminatów metalowo-kompozytowych o różnym ułożeniu warstw. Można by wykorzystać znajdujące się w spisie literatury prace (ponad 40 pozycji) ściśle związane z tematyką rozprawy, opisać je, a następnie na tej podstawie sformułować problem badawczy, cel i zakres pracy, wskazując elementy nowości. Pomimo powyższego, należy stwierdzić, że Doktorant przedstawił porównanie i odniósł się do pozycji literaturowych ostatnich lat, jednakże są one rozproszone po całym tekście – znajdują się w podsumowaniu każdego rozdziału (etapu prowadzenia analizy trwałościowej).

Zagadnienia nieliniowe w przyjętych modelach numerycznych MES rozwiązano wykorzystując metodę Newtona-Raphsona, która przy sterowaniu siłą powoduje brak zbieżności rozwiązania w przypadku, gdy dla rosnących przemieszczeń siła obciążająca maleje. Doktorant poradził sobie z tym problemem, stosując jawną metodę całkowania. Przyjęty model nazwany został „modelem dynamicznym”, co wprowadza czytelnika w błąd, gdyż nie rozważane były żadne obciążenia dynamiczne. Nasuwa się zatem pytanie: Czy autor pracy rozważał zastosowanie metody Riksa lub sterowanie przemieszczeniem pozostając przy metodzie Newtona-Raphsona? Jeżeli tak, to dlaczego zrezygnował z takiego podejścia?

W pracy skupiono się jedynie na czterech przypadkach układu warstw, zauważa się brak uogólnień, które można by przedstawić korzystając z zaproponowanych modeli obliczeniowych. Wykorzystując wprowadzony potencjał odporności zmęczeniowej laminatu można pokusić się np. o wyznaczenie najlepszej grubości warstw aluminium w CARALL lub najlepszego stosunku grubości warstw w laminacie hybrydowym.

Zauważono, że ściskające naprężenia cieplne w laminacie CFRP mają korzystny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową. Jednakże, w pracy badano tylko cykl dodatni, czy zatem podobny korzystny wpływ miałyby takie naprężenia wstępne przy innym cyklu obciążenia, w którym występują naprężenia ściskające.

Pewien niedosyt budzi brak podjęcia próby analizy laminatów z kątowno ułożonymi warstwami kompozytów CFRP czy GFRP, tym bardziej, że w pracy przedstawiono odpowiednie równania transformacyjne (obrót włókien w stosunku do kierunku obciążenia). Zakładam, że taki model Doktorant proponuje w planie dalszych badań, o czym zresztą wspomina na str. 136 rozprawy.

3.2. Uwagi szczegółowe

1. W równaniu 4.33 pojawia się wielkość $A^{(lam)}$, która zdefiniowana jest jako podmacierz $[A_{ij}]$ macierzy sztywności laminatów w odniesieniu do jego grubości $t^{(lam)}$. Dlaczego nie użyto w tym równaniu tylko macierzy sztywności $[A_{ij}]$ zamiast iloczynu nowego parametru $A^{(lam)}$ i grubości laminatu $t^{(lam)}$.
2. W rozdziale 7.2. Autor pisze: „Metodykę dotyczącą dokładnego przewidywania liczby cykli zmęczeniowych do inicjacji pęknięcia w laminatach FML przedstawił (Spronk

- i współ., 2015).”, powyższe stwierdzenie implikuje pytanie jak zatem rozszerzony jest model Doktoranta w odniesieniu do metodyki zaproponowanej przez Spronka ?
3. W rozdziale 12. dotyczącym powstawania naprężeń cieplnych zaprezentowano model MES do analiz cieplno-mechanicznych. W ocenie recenzenta bardziej czytelne byłoby zaproponowanie jednego rozdziału, zawierającego opis zastosowanych modeli MES.
 4. W opisie metody MES znajduje się zapis, że analizę podzielono na trzy kroki, przy czym ten pierwszy jest tylko zadaniem warunków początkowych ($T=135^{\circ}\text{C}$), pierwszy krok to chłodzenie, a drugi obciążenie mechaniczne.
 5. Na str. 91 w opisie wyników do rys. 15-14 – 15.16 pojawia się stwierdzenie „Użycie modelu laminatu w JSN nie powoduje znaczących odstępstw wyników otrzymywanych poprzez stosowanie modelu laminatu w PSN oraz TSN.”, pomimo odmiennych przebiegów krzywych modelowych dla TSN i JSN na rys. 15.14 i 15.15 w zakresie przemieszczeń 1.5 – 3.5 mm – proponuje się wyjaśnić te różnice.
 6. Do łatwej oceny zaproponowanej metody zabrakło zestawienia krzywych S-N otrzymanych eksperymentalnie i za pomocą zaproponowanego modelu np. tych z wykresów na rys. 17.6 i 18.5.
 7. Drobne błędy:
 - a. na stronie 93 pojawia się niezrozumiałe stwierdzenie: „Zaobserwowano, że badane kompozyty epoksydowo-węglowe charakteryzują się znacznie lepszą odpornością na zmęczenie mechaniczne niż kompozyty epoksydowo-węglowe.”
 - b. w rozdziale 7.4 jest tylko jeden podrozdział 7.4.1;
 - c. schemat blokowy przedstawiony na rys. 16.2 zawiera różne kształty poszczególnych elementów (bloków) schematu – co oznaczają te kształty, dlaczego są różne?
 - d. brak omówienia wyników na rys 17.1 – 17.4 i tablicach 17.1 - 17.4
 - e. nie jasne jest co oznaczają różne % na rys. 18.6-18.9;
 - f. w spisie literatury pojawia się wiele pozycji mało związanych z tematem pracy, np. prace dotyczące odporności materiału na uderzenie;
 - g. w równaniu 4.37 prawdopodobnie zastosowano niewłaściwy indeks tj. zamiast $\alpha^{(lam)}$ jest α_{lam} ;
 - h. brak odniesień w tekście do załącznika B.2 oraz do treści w nim zawartych;
 - i. nieliczne drobne błędy składni i „literówki”.

4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Lektura rozprawy pozwala stwierdzić, że mgr inż. Konrad Dadej poprawnie zdefiniował i rozwiązał problem naukowy, posiada wiedzę i umiejętności korzystania z numerycznych metod mechaniki, a w szczególności z metody elementów skończonych, zna zagadnienia mechaniki kompozytów (laminatów). Autor przedstawionej do oceny rozprawy wykazał, że posiadał umiejętność prowadzenia badań eksperymentalnych i dogłębnej analizy jej wyników.

Na podstawie treści zawartych w pracy można stwierdzić, że Doktorant potrafi budować modele analityczne dla opisu zachowania się struktury wraz z wyznaczeniem stanu naprężeniowo-odkształceniowego oraz udowodnieniem zastosowanych założeń; potrafi zaplanować i przeprowadzić eksperyment, walidować opracowany model analityczny wynikami numerycznymi i eksperymentalnymi.

Mgr inż. Konrad Dadej sformułował i rozwiązał ważny problem naukowy oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych.

Istotnym wkładem w dyscyplinę mechanika jest zaproponowanie modelu analitycznego do aproksymacji krzywych zmęczeniowych S-N dla laminatów metalowo-włóknistych w oparciu o krzywe S-N dla materiałów monolitycznych stanowiących poszczególne warstwy.

Mimo przedstawionych w recenzji uwag krytycznych uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Konrada Dadeja p.t.: „*Wpływ konfiguracji warstw laminatu metal-kompozyt na odporność zmęczeniową*” spełnia warunki stawiane przez:

- Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003r z późniejszymi zmianami,
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 stycznia 2018 roku i na tej podstawie **wniosuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**

Tomasz Kwiecień