

Wrocław, 30.11.2018 r.

dr hab. inż. Wojciech Błażejowski  
Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska  
ul. Smoluchowskiego 25, 50-372 Wrocław,  
e-mail: wojciech.blazejewski@pwr.edu.pl



## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej

pt. *Wpływ konfiguracji warstw laminatu metal-kompozyt na odporność zmęczeniową*,  
mgr. inż. **Konrada Dadeja** z Politechniki Lubelskiej,

wykonanej pod kierunkiem

prof. dr hab. inż. Barbary Surowskiej z Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

Recenzję sporządzono na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej nr WM/454/2018, z dnia 31 października 2018 r.

### **1. Wprowadzenie**

Aktualna praca doktorska przedstawiona do recenzji została uporządkowana, poprawiona oraz rozszerzona i uzupełniona w porównaniu do poprzedniej wersji. Zmiany te nie wpływają znacząco na ostateczną ocenę pracy, gdyż ogólna ocena jest wyższa i również pozytywna. Należy podkreślić duży wkład Doktoranta we wprowadzeniu zmian, co podwyższa walory naukowe pracy i świadczy o sporym przygotowaniu Autora. Trzeba zaznaczyć, że obecna recenzja zawiera kilka stwierdzeń i spostrzeżeń z poprzedniej, ponieważ są one nadal aktualne, jak np. te dotyczące wprowadzenia, charakterystyki, osiągnięć czy wniosku końcowego. Niewątpliwie pracę czyta się znacznie lepiej, a niniejsza recenzja jest uaktualniona i nie należy jej łączyć z poprzednią.

Głównym celem podjętych przez Doktoranta prac było określenie związku między konfiguracją warstw laminatu metalowo-włóknistego (FML) a wynikową wytrzymałością zmęczeniową. Autor dokonał analizy teoretycznej, przeprowadził szereg symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych wpływu konfiguracji warstw FML na ich wytrzymałość statyczną i zmęczeniową. Zaproponowane modele analityczne sprawdził poprzez symulacje MES wspomagane komputerowo. Uzyskał dobrą zgodność między wynikami modelowania analitycznego, symulacjami numerycznymi oraz przedstawionymi wynikami badań eksperymentalnych. Rozpatrywał, zarówno analitycznie jak i eksperymentalnie, zagadnienia rozszerzalności cieplnej przy wytwarzaniu FML-i, występowanie zakresu szczytkowej wytrzymałości zmęczeniowej, a także opracował i dokonał eksperymentalnej weryfikacji uogólnionych modeli przewidywania wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej FML-i.

W pracy dokonano dużego i wnikliwego przeglądu literatury, ok. 170 pozycji, tylko angielskojęzycznych, o zasięgu międzynarodowym. Świadczy to o dużej erudycji Autora. Wśród tych publikacji znajduje się 7 wysoko punktowanych prac (+1 nowa), których Doktorant jest współautorem.

Podsumowując, zamierzenia Autora wskazują na eksperymentalny charakter przedstawionej pracy wzbogaconej dużą dawką wnikliwej i szerokiej analizy teoretycznej popartej własnymi przemyśleniami, spostrzeżeniami i pomysłami w postaci modeli obliczeniowych, opisu zjawisk czy anomalii zaobserwowanych w czasie obciążania i degradacji charakterystycznych dla przedmiotowej grupy materiałów. Tematyka badawcza podjęta w pracy jest oryginalna, o znaczeniu poznawczym w zakresie wytrzymałości materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknami oraz łączonych z metalem – FML. Narzędzia badawcze (maszyny wytrzymałościowe, technologiczne, sprzęt komputerowy z oprogramowaniem itd.) wykorzystane przy realizacji postawionych i osiągniętych celów są nowoczesne i unikatowe w skali kraju. Należy zaznaczyć, że wspomniane zagadnienia badawcze są aktualnymi i ważnymi problemami w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Podejście Autora do badań, projektowania, planowania eksperymentu, analizy wyników poprzedzonych wnikliwym przeglądem literatury jest trafne, rzeczowe i efektywne; użyte metody i narzędzia obliczeniowe są profesjonalne. Powyższe pozwala łącznie stwierdzić, że wybór tematyki badawczej, zawartej w przedłożonej rozprawie, jest aktualny naukowo i aplikacyjnie oraz zawiera się w obszarze szeroko rozumianej mechaniki jako dyscypliny naukowej.

1

## 2. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska pt. *Wpływ konfiguracji warstw laminatu metal-kompozyt na odporność zmęczeniową*, liczy 172 strony wraz z towarzyszącymi spisami i załącznikiem. Składa się z dwudziestu rozdziałów, krótkiego i zwięzłego streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu symboli, znaczeń i skrótów oraz spisu obszernej i dość dobrze dobranej literatury. Spis literatury zawiera 168 prac i normy. Sposób cytowania literatury – podanie w nawiasie zwykłym nazwiska pierwszego autora, ewentualnie drugiego lub dopisek *i współ.* oraz podanie roku wydania publikacji – jest w sumie wygodny dla czytelnika, ale przyczynia się do zwiększenia objętości pracy (spis zajmuje łącznie ok. dwóch stron). Średnio na każdą stronę części merytorycznej pracy przypada jeden rysunek lub tabela czy formuła obliczeniowa. Autor używa ciekawych skrótów, oznaczeń, symboli, np.: *komp.*, *Total*, *prop.* itd. Załączniki A i B do pracy stanowią łącznie 17 stron.

W rozdziałach 1–8 Autor dokonuje przeglądu literatury, w sposób bardzo obszerny, z podziałem na tematy badawcze; określa ramy, w których będzie się poruszał w czasie badań. Wstęp, czyli rozdział 1 jest dwustronicowym streszczeniem pracy. Dalej następuje charakterystyka laminatów FML, opis ich mechaniki przy wykorzystaniu znanych autorskich formuł, modelowania MES, zagadnień zmęczenia i wytrzymałości. Autor wprowadza czytelnika do obszaru swoich badań określając ich wynik. Wszystko zostało krótko zebrane w podsumowaniu rozdziału 8.

W rozdziałach 9, 10 Autor określa cel i zakres pracy. W rozprawie nie zostały sformułowane i jasno podane tezy pracy, ale wynikają one z postawionych celów i mogłyby być podane – np. jednym z wniosków jest: *Obecność naprężeń cieplnych w laminatach FML wpływa korzystnie na ich wytrzymałość na rozciąganie*. Niektóre z zamieszczonych rysunków są kopiowane z cytowanych prac wraz z formułami obliczeniowymi, jednak Autor zadał sobie trud ujednolicenia symboliki i nazewnictwa.

W rozdziale 11 krótko, bo na 4 stronach, określono metodykę badań, wykorzystując zestawienia konfiguracji próbek i ich badań w tabelach i schematach. Uzyskane materiały przedstawiono w postaci struktur widzianych pod lupą (powiększenia poniżej 50 razy). Jednak w przypadku odczuwanego przez czytelnika niedosytu informacji, można do nich dotrzeć, jak zaznacza Autor, w pracach *Bienias 2010 i 2011*.

Rozdziały 12–18 zawierają opis badań i wyniki prac obliczeniowych, modelowania i eksperymentalnych. W rozdziale 12 analizowano wpływ konfiguracji warstw na dystrybucję naprężeń cieplnych w FML wykorzystując metodę analityczną teorii laminatów oraz numeryczną MES. Rozdział 13 zawiera opis sprężysto-plastycznego modelu badanego laminatu, w tym analizę obciążeń mechanicznych z uwzględnieniem naprężeń cieplnych. W rozdziale 14 analizowano kryterium odkształceniowe statycznego niszczenia materiału i dokonano pierwszego porównania modelu analitycznego z wynikami badań eksperymentalnych. Rozdział 15 zawiera wyniki modelowania analitycznego przy obciążeniach statycznych poszczególnych warstw/materiałów z uwzględnieniem naprężeń cieplnych. Przedstawiono wyniki ewaluacji analitycznych w porównaniu do badań eksperymentalnych. Rozdział 16 zawiera wyniki obliczeń analitycznych zmęczenia z uwzględnieniem konfiguracji warstw laminatów. W rozdziale 17 zajęto się przewidywaniem etapu szczątkowej wytrzymałości zmęczeniowej. Rozdział 18 zawiera wyniki i omówienie przeprowadzonych eksperymentalnych badań zmęczeniowych, przedstawiono w nim szereg wyznaczonych krzywych S-N dla badanych konfiguracji, a także zagadnienie utraty sztywności obciążanych cyklicznie laminatów.

Całość zamykają: podsumowanie pracy, synteza wyników badań (jako rozdział 19) oraz wnioski (rozdział 20). Na końcu pracy znajdują się integralne załączniki: A, liczący 5 stron, który zawiera zestaw danych eksperymentalnych dla badanych konfiguracji laminatów w postaci wykresów naprężenie – odkształcenie, oraz B liczący 13 stron, który zawiera opisy naprężenia „laminy” (oryginalna pisownia) w funkcji odkształcenia i naprężenia laminatu (w kierunku drugim spowodowane odkształceniem warstwy i laminatu w kierunku pierwszym). W załączniku B porównano wartości naprężeń w warstwach laminatu FML obliczone na podstawie zaproponowanego przez Autora modelu sprężysto-plastycznego (jednowymiarowego) z modelem znanym z literatury dla laminatu FML w płaskim stanie naprężenia, który jest odpowiedni w zakresie sprężystym. Wyniki naprężeń w poszczególnych warstwach porównano korzystając z hipotezy Maksymiliana Tytusa Hubera – 1904 w warstwie aluminium, a także kryterium maksymalnych naprężeń w warstwach kompozytu.

2  
Władysław Kuciński

### 3. Uwagi krytyczne, pytania i sugestie

W czasie zapoznawania się z rozprawą czytelnik ma wrażenie, że praca jest czysto teoretyczna, głównie cytowane są modele analityczne, w tym własne, obliczenia numeryczne, rozważania i założenia teoretyczne itp. Implementowane modele są często kopiowane z literatury, gdzie stosowano inne oznaczenia i zapisy matematyczne, ale autor postarał się, aby oznaczenia te ujednolicił lub z formuł wątpliwych zrezygnował. W końcowej części rozprawy pojawiają się wyniki prac eksperymentalnych z informacjami np. jak były przygotowane próbki i jakich materiałów użyto (również w rozdziale 11). Dodatkowo także Autor wskazuje, w której z jego publikacji należy szukać szerszych informacji dotyczących „kuchni”, przygotowania próbek, wyglądu złomów itp. Autor przedstawia krótkie opisy badań eksperymentalnych i właściwie tylko kilka zdjęć rzeczywistych próbek. Procesy niszczenia, odkształcania, naprężenia cieplnego próbek itp. wyjaśniane są na schematach, wykresach. Brak jest analiz przełomów, opisu mechanizmów zniszczenia, jedynie przy okazji rys. 18.10 można zobaczyć badany materiał. Cenne byłoby poparcie opisów zdjęciami zniszczonych próbek. Nadal odczuwa się niedosyt co do rzeczywistych wyglądków badanych materiałów.

#### Uwagi i pytania szczegółowe:

1. Str. 7: Wykaz symboli, znaczeń i skrótów przydałoby się bardziej rozszerzyć i sprecyzować. Np. co oznaczana  $k$ ?, W wykazie  $k$  oznacza warstwy materiału w laminacie, czyli laminy materiału w laminacie? Także  $S$  – w spisie oznacza statyczną wytrzymałość na ścinanie, na str. 41  $S$  to obciążenie, a na str. 42  $S_{\infty}$  to dolna granica wytrzymałości zmęczeniowej.
2. Str. 22: *Studzenie laminatu metalowo-włóknistego od temperatury wiązania żywicy epoksydowej do temperatury pokojowej powoduje jego skurcz.* Co to znaczy? To zdanie sugeruje niewłaściwe jednostronne rozumienie zjawiska utwardzania i skurczu. Skurcz jest przede wszystkim wynikiem zachodzących reakcji chemicznych.
3. Str. 59: O technice autoklawowej napisano zbyt mało. Zdanie: *zastosowany proces wytwarzania laminatów FML w autoklawie był analogiczny jak ten opisany w publikacji... jest wymijające.* Czytelnik odczuwa niedosyt informacji technologicznych; brak schematu wytwarzania próbek. Nie wiadomo jak dobrano i sprawdzano włókno/prepreg, w jaki sposób układano włókna? Jak kontrolowano naciąg? Jak przygotowywano powierzchnie aluminium? Wyjaśnienie jest skąpe. Czy dokonywano oceny jakości wykonania próbek, np. metodami nieniszczącymi – szerografia, metody ultradźwiękowe itp.? W pracach doktorskich powinny znajdować się opisy tzw. „kuchni” i to znacznie szersze niż te zawarte w artykułach czasopism, które Autor poleca.
4. Str. 60: Warto rozważyć zastosowanie nowoczesnych „pełnoobrazowych” technik pomiarowych z wykorzystaniem np. cyfrowej korelacji obrazu czy dobrze znanych metod elastooptycznych. W pracy wykorzystano techniki pomiarów opartych na tensometrii oporowej – dlaczego nie próbowano użyć, korelować tych technik – także w kontekście weryfikacji modeli numerycznych?
5. Str. 62: Czy efekt naprężeń cieplnych występujący w badanych FML-ach można porównać do tzw. wzmacniania cylindrów metalowo-kompozytowych przez tzw. autofretaż (przepiężanie)? Może warto zastanowić się nad tym zjawiskiem i wykorzystać w materiałach FML?
6. Str. 69: model MES przedstawiony w rozdziale 12.2 można było lepiej, szerzej opisać. Brak jednostek na rys. 12.7 lub są one nieczytelne na skali kolorów.
7. Str. 78: Może zamiast wykresów naprężenie – przemieszczenie lepiej by było przedstawić wykresy siła – przemieszczenie? Albo siła znormalizowana  $F=F_{\max}$ , np.  $F=0,5F_{\max}$ ? Chodzi np. o rys. 14.1.
8. Str. 85: Przy porównywaniu metody analitycznej z numeryczną (MES) i odwrotnie trzeba pamiętać, że obie metody obliczeniowe są przybliżone, o jakiejś dokładności. Dobrze byłoby włączyć do tego porównania wyniki prac eksperymentalnych.
9. Str. 91: na rys. 15.17, przedstawiono *Przykład zniszczonego laminatu...* (wirtualnej próbki). Szkoda, że przy tym rysunku nie pokazano rzeczywiście zniszczonej próbki. Poza tym skala kolorów jest nieczytelna.
10. Str. 92: Czy była prowadzona analiza wrażliwości modelu na niewielkie zmiany wartości, np. siły? Chodzi o sprawdzenie modelu – czy nie osiąga dziwnych wyników przy nieznaczących zmianach wartości użytych wyrażeń.
11. Str. 122 i dalej: Dlaczego nie przeprowadzono żadnej analizy statystycznej wyników eksperymentalnych?

3  
Wojciech Kuciel

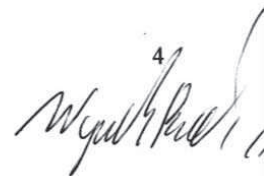
#### Uwagi edytorskie, redakcyjne, pomyłki:

Rozprawa jest zredagowana na dobrym poziomie, występują pojedyncze błędy i niezręczności, o których nie ma sensu wspominać, gdyż nie zaburzają one rozumienia i oceny treści merytorycznej przedłożonej dysertacji.

#### **4. Główne osiągnięcia pracy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest pracą wartościową. Główne jej osiągnięcie to określenie wpływu konfiguracji warstw w laminacie metalowo-włóknistych na jego odporność zmęczeniową oraz występowanie etapu szczytkowej wytrzymałości zmęczeniowej i naprężeń technologicznych. Szczegółowe osiągnięcia recenzowanej rozprawy przedstawiają się następująco:

1. Dokonanie obszernego przeglądu literatury o zasięgu międzynarodowym oraz wskazanie, że dotychczas opisywane zachowanie materiałów FML w czasie badań zmęczeniowych było oceniane jako analogiczne do klasycznych metali, z występującym, ale rzadko w literaturze uwzględnionym, efektem mostkowania - pomija się szczytkową wytrzymałość zmęczeniową. Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono także brak adekwatnych modeli obliczeniowych do przewidywania wytrzymałości zmęczeniowej laminatów FML. Dla poparcia tego stwierdzenia poddano analizie kilka modeli, w tym koncepcję Kawai.
2. Rozwinięcie opisu dotyczącego występowania tzw. dodatkowego okresu w cyklu życia zmęczeniowego FML-i, gdzie po pęknięciu zmęczeniowym warstwy metalu na wskroś, warstwy kompozytowe wciąż zachowywały zdolność do przenoszenia obciążeń zmęczeniowych.
3. Wskazanie na wyższe wytrzymałości zmęczeniowe FML-i typu CARALL w porównaniu do GLARE, co zostało poparte wynikami przeprowadzonych badań.
4. Zaproponowanie koncepcji uniknięcia występowania korozji galwanicznej pomiędzy metalem a kompozytem węglowym przez wykonanie izolacji GRP. Koncepcja ta nazwana FML-em hybrydowym została zbadana eksperymentalnie, statycznie i zmęczeniowo oraz analitycznie.
5. Sporządzenie wykresów S-N badanych konfiguracji FML-i, z opisem niszczenia spójnego czy szczytkowego. Jest to związane z warstwowym i kompozytowym charakterem materiałów FML. Zaobserwowano i opisano mechanizm niszczenia zmęczeniowego FML-i w zakresie niskocyklowym; warstwą najmniej wytrzymałą zmęczeniowo jest aluminium, co ma wpływ na zniszczenie zmęczeniowe tzw. spójnego laminatu. w zakresie niskocyklowym najmniej wytrzymałą warstwą jest kompozyt. Ulega to zmianie w zakresie wysokocyklowym gdzie najmniej wytrzymałą zmęczeniowo warstwą jest aluminium. Szczytkowa wytrzymałość zmęczeniowa była obserwowana w zakresie wysokocyklowym.
6. Wykazanie, na podstawie uzyskanych wyników badań, wysokich walorów użytkowych materiału FML, najlepiej wzmocnionych włóknem węglowym. Chodzi o możliwość pracy konstrukcji przy uszkodzeniu np. zewnętrznej powierzchni aluminiowej.
7. Opracowanie nowego autorskiego modelu obliczeniowego przewidywania wytrzymałości zmęczeniowej laminatów FML. Podstawą tego modelu jest rozkład naprężeń wewnętrznych w obciążonym cieplnie i mechanicznie laminacie.
8. Opracowanie modelu analitycznego zachowania statycznego laminatu FML. Zaproponowany model jest przeznaczony do obciążeń rozciągających laminatu i wykorzystuje warunki brzegowe Voigta, w których obciążenie statyczne laminatu powoduje takie same odkształcenia wszystkich warstw. Opracowany model uwzględnia występowanie zarówno zakresu sprężystego, jak i plastycznego, warstwy metalowej oraz wpływ naprężeń cieplnych obecnych w laminacie na rozkład naprężeń wewnętrznych.

4  


9. Osiągnięcie zgodności wyników zaproponowanego modelu analitycznego i symulacji MES. Wyniki autorskiego analitycznego modelu odkształceniowego porównano z wynikami przewidzianymi w modelu numerycznym MES stosując analizę quasi-statyczną oraz dynamiczną w programie ABAQUS, oraz porównano wyniki zaproponowanego modelu z wynikami modelu bardziej zaawansowanego – charakteryzującego laminat w płaskim stanie naprężenia, czyli modelu 2D.

10. Użycie odwróconego równania Kohouta-Vecheta w pętli do przewidywania wytrzymałości zmęczeniowej badanych laminatów FML na poziomie do ostatniej warstwy, co zaprezentowano na wykresach charakterystyk S-N.

## 5. Podsumowanie

Temat rozprawy doktorskiej podjęty przez Pana mgr. inż. **Konrada Dadeja**: *Wpływ konfiguracji warstw laminatu metal-kompozyt na odporność zmęczeniową*, jest tematem trudnym, ale także o dużym znaczeniu naukowym i praktycznym, ze względu na rosnący udział tego typu materiałów w zastosowaniach inżynierskich. Niezwykle rzadko dzisiaj spotkać można prace doktorskie poruszające zagadnienia związane ze zmęczeniem materiałów, a szczególnie kompozytowych. Należy podkreślić, że od ponad 150 lat zgłębiano zjawisko zmęczenia metali i do tej pory nie znaleziono adekwatnych narzędzi obliczeniowych. Nie ma dobrej hipotezy zmęczeniowej dla metali, a tym bardziej dla nieliniowych materiałów kompozytowych, jakimi są FML-e.

Rozprawa doktorska zawiera oryginalne osiągnięcia Pana mgr. inż. Konrada Dadeja, które zostały opublikowane w sumie w ośmiu pracach o zasięgu międzynarodowym, w tym z tzw. IF. Doktorant już dziś legitymuje się relatywnie dobrym dorobkiem naukowym: liczba cytowań Autora – 45 (w tym 17 bez autocytowań), indeks H – 4 (wg Google scholar). Mając na uwadze powyższe należy stwierdzić, że dorobek naukowy Doktoranta jest w tym zakresie ponadprzeciętny.

Główne osiągnięcia rozprawy, jak wspomniano, dotyczą materiału już opublikowanego w renomowanych czasopismach (m.in. *International Journal of Fatigue, Engineering Fracture Mechanics*), czyli prac, których Doktorant jest współautorem. Stąd wniosek, że formalnie Autor dobrze spełnia kryteria wymagane przy obronie swoich tez.

Autor wykazał się umiejętnościami planowania i obsługi eksperymentu oraz prowadzenia obliczeń wytrzymałościowych z wykorzystaniem MES wspomaganą komputerowo. Podjęta tematyka badawcza jest oryginalna, o dużym znaczeniu poznawczym w zakresie wytwarzania i wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej materiałów FML.

## 6. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Konrada Dadeja pt. *Wpływ konfiguracji warstw laminatu metal-kompozyt na odporność zmęczeniową* stanowi dorobek naukowy i istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Mechanika. Oceniana praca doktorska jest wystarczająca i **spełnia warunki** dotyczące nadania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie **Mechanika** określone przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw nr 65, 2003r z późniejszymi zmianami). **Stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr. inż. Konrada Dadeja do dalszych etapów przewodu doktorskiego na podstawie dysertacji pt. Wpływ konfiguracji warstw laminatu metal-kompozyt na odporność zmęczeniową, w dyscyplinie naukowej Mechanika.**

  
Wojciech Błażejewski

