



Prof. zw. dr hab. inż. MARIAN ŻENKIEWICZ

Kierownik Katedry Inżynierii Materiałowej

UNIWERSYTET KAZIMIERZA WIELKIEGO w BYDGOSZCZY

ul. Chodkiewicza 30, 85-064 BYDGOSZCZ, e-mail: marzenk@ukw.edu.pl



Bydgoszcz, 06.08.2010 r.



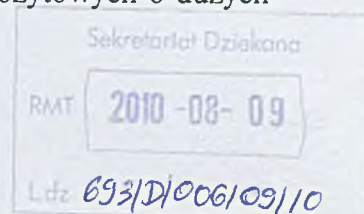
RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Pawlaka pt.: „Termograficzna metoda oceny rozkładu udziału włókien w kompozytach epoksydowo-węglowych”

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Jerzego Świdra (pismo RMT0 – 675/D/006/09/10 z dnia 19.07.2010 r.). Po wstępnej analizie treści rozprawy przesłanej mi przez Pana Dziekana stwierdzam, że jej tematyka jest zgodna z moimi zainteresowaniami naukowymi i że ze względów merytorycznych mogę podjąć się opracowania recenzji tej rozprawy. Jednocześnie oświadczam, że nie prowadziłem i nie prowadzę z Doktorantem żadnych wspólnych badań naukowych oraz że nie jesteśmy wspólnie autorami jakiegokolwiek publikacji naukowej.

1. Znaczenie tematyki, zakres i dyscyplina naukowa rozprawy

Nieniszczące metody badań materiałów inżynierskich, a w szczególności badania kompozytów o osnowie polimerowej, są w ostatnich latach przedmiotem coraz większego zainteresowania zarówno pod względem naukowym jak i użytkowym. Stosuje się je głównie podczas badań materiałów i produktów znajdujących się w końcowej fazie procesów produkcyjnych (kontrola jakości) lub będących w trakcie eksploatacji (badania diagnostyczne, badania przyczyn awarii). Jedną z ważnych metod badawczych, należących do tej grupy, jest termografia aktywna. Jej rozwój stymulowany jest w dużym stopniu konkretnymi potrzebami przemysłu, a w tym potrzebami badań materiałów i przedmiotów kompozytowych o dużych



rozmiarach. Są one prowadzone najczęściej w celu wykrywania różnych wad materiałowych, powstających podczas produkcji lub wykrywania uszkodzeń eksploatacyjnych. Dotyczą przede wszystkim lokalizacji oraz oceny charakteru i rozmiarów takich wad lub uszkodzeń, jak: wtrącenia obce lub kawerny, delaminacje, pęknięcia oraz uszkodzenia typu zmęczeniowego.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest próba zastosowania termografii aktywnej do zbadania dyfuzyjności cieplnej kompozytów epoksydowo-węglowych i przeprowadzenia oceny ilościowej zawartości włókien węglowych w kompozytach warstwowych o osnowie epoksydowej. Obejmuje ona analizę literaturową, głównie dotyczącą charakterystyk kompozytów epoksydowo-węglowych i termograficznych metod ich badania. Wyniki tej analizy stanowią podstawę sformułowania tezy badawczej, celu i zakresu rozprawy. Wstępne badania eksperymentalne służą doborowi odpowiednich warunków wymuszenia cieplnego i ustalenia planu badań zasadniczych, przeprowadzonych metodą termografii aktywnej, mających na celu określenie charakterystyk czasowo-temperaturowych badanych kompozytów, zastosowanych później do wyznaczenia ich dyfuzyjności cieplnej. Tak uzyskane wyniki są wykorzystane do opracowania modeli diagnostycznych umożliwiających ocenę ilościową zawartości włókien w próbkach badanych kompozytów o grubości od 3 do 8 mm.

Temat rozprawy dotyczy oryginalnego zastosowania termografii aktywnej i nie był dotychczas przedmiotem badań szczegółowych. Odpowiada on zapotrzebowaniu współczesnej nauki i techniki, szczególnie w zakresie związanym z badaniami materiałów kompozytowych. Dlatego należy wyrazić duże uznanie Promotorowi rozprawy, Panu prof. dr. hab. inż. Gabrielowi Wróblowi, wybitnemu specjalście i uznanemu autorytetowi naukowemu z zakresu badań nieniszczących, za inspirację, nadzór merytoryczny oraz trafne ustalenie zakresu nowatorskich badań przeprowadzonych w ramach tej rozprawy. Uznanie takie należy wyrazić również Doktorantowi za staranne wykonanie, duży wkład pracy oraz ciekawe i wartościowe wyniki przeprowadzonych badań, a w szczególności za opracowanie nowych i oryginalnych modeli diagnostycznych służących do badań kompozytów epoksydowo-węglowych.

Według podziału przedstawionego w *Uchwale Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów* z dnia 23 czerwca 2003 r. w sprawie określenia dziedzin nauki i dziedzin sztuki oraz dyscyplin naukowych i artystycznych (M.P. z dnia 14 sierpnia 2003 r., nr 40, poz. 586) rozprawa ta kwalifikuje się do dziedziny nauki: **14. Nauki Techniczne**, dyscyplina naukowa:

14.12 Inżynieria Materiałowa, w zakresie związanym z szeroko pojętymi metodami badań materiałów polimerowych.

2. Teza badawcza i cele rozprawy

Teza badawcza recenzowanej rozprawy ma następujące brzmienie:

”Dla kompozytów warstwowych epoksydowo-węglowych istnieje możliwość wyznaczania rozkładu zawartości włókien metodą termografii aktywnej na podstawie analizy uzyskanych charakterystyk czasowo-temperaturowych. Możliwe jest opracowanie modeli diagnostycznych wiążących ilościowo wybrany parametr nieustalonego przepływu ciepła z zawartością włókien w rozpatrywanej grupie materiałów”.

Tak sformułowana **teza ma charakter opisowy, jest zwięzła i krótka oraz merytorycznie właściwa**. Teza ta trafnie odzwierciedla istotę recenzowanej rozprawy.

Celem naukowym rozprawy jest analiza i ocena stanu wiedzy z zakresu objętego przedmiotem rozprawy oraz określenie wpływu zawartości włókien w kompozytach epoksydowo-węglowych na dyfuzyjność cieplną tych kompozytów, wyznaczaną za pomocą termografii aktywnej. Z celem naukowym rozprawy ściśle wiąże się jej cel użytkowy, jakim jest opracowanie nowej, nieniszczącej metody oceny rozkładu ilościowego zawartości włókien w kompozytach epoksydowo-węglowych, przy czym podstawą tej oceny jest wyznaczona wcześniej dyfuzyjność cieplna badanego materiału. Ocena tej zawartości przeprowadzana jest za pomocą modeli diagnostycznych opracowanych przez Doktoranta. **Zakres i cele rozprawy zostały określone właściwie. Są one sformułowane w sposób jasny i zrozumiały.**

3. Układ rozprawy

Recenzowana rozprawa jest pracą naukową, w której elementy teoretyczne (analiza zjawisk związanych z przepływem ciepła oraz możliwości i ograniczenia termografii aktywnej, analiza statystyczna wyników badań, opracowanie modeli diagnostycznych i ich ocena statystyczna), łączą się w sposób zrównoważony z elementami eksperymentalnymi (opracowanie konstrukcji i wykonanie stanowiska badawczego, badania dyfuzyjności cieplnej kompozytów o różnej zawartości włókien węglowych i o różnej grubości). **Tytuł rozprawy jest adekwatny do zawartych w niej treści.**

Rozprawa składa się ze wstępu i pięciu rozdziałów, zawierających kolejno tezę badawczą i cele rozprawy, opis badań eksperymentalnych, omówienie wyników badań oraz wnioski końcowe. Ponadto rozprawa zawiera spis treści, wykaz literatury i streszczenia w języku polskim i angielskim. **Układ treści rozprawy jest prawidłowy i typowy dla rozpraw doktorskich z nauk technicznych.**

Rozprawa składa się z 112 stron i zawiera 78 rysunków oraz 27 tabel. Ponadto rozprawa zawiera trzy załączniki, liczące łącznie 45 stron i zawierające szczegółowe wyniki badań eksperymentalnych w postaci 86 wykresów i 15 tabel. Cytowana literatura liczy 120 pozycji, przy czym zdecydowaną większość (91 pozycji) stanowią prace anglojęzyczne. Wykaz literatury zawiera czasopisma i książki o dużej renomie w świecie naukowym.

Bardzo wysoko oceniam dobór treści, układ i sposób napisania rozprawy. Głównymi jej zaletami w tym zakresie są: zwięzłość i jasność przedstawiania badanych problemów, właściwa kolejność realizowania poszczególnych etapów badań, trafna terminologia naukowa i techniczna, a także pełen zakres wyników badań przedstawiony w rozprawie i w poszczególnych załącznikach. Oceniam również, że dobór literatury jest trafny, wyczerpujący pod względem merytorycznym i zawierający najbardziej aktualne pozycje dostępne w obiegu światowym.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Różne metody badań nieniszczących, a w tym również termowizja aktywna, są przedmiotem intensywnego rozwoju, szczególnie w ostatnich dwudziestu latach. Rozwój ten jest stymulowany zainteresowaniami naukowymi i konkretnymi potrzebami przemysłu oraz wciąż rosnącymi możliwościami aparatury badawczej, a w szczególności kamer termowizyjnych. Wśród wielu publikacji dotyczących różnych zastosowań termowizji aktywnej, nie znalazłem doniesień naukowych na temat wykorzystania jej do ilościowego wyznaczania zawartości włókien w warstwowych kompozytach epoksydowo-węglowych. **Zatem istotnym elementem nowości naukowej i aplikacyjnej recenzowanej rozprawy jest bliższe poznanie wpływu zawartości włókien w warstwowych kompozytach epoksydowo-węglowych i grubości tych kompozytów na ich dyfuzyjność cieplną oraz opracowanie na tej podstawie nowej, oryginalnej metody ilościowej lub jakościowej oceny zawartości tych włókien.**

Analiza literatury, dotyczącej przedmiotu badań prowadzonych w ramach rozprawy, wykonana została sumiennie i szczegółowo. Jej wyniki stanowią rzetelną podstawę służącą

sformułowaniu właściwej tezy badawczej i poprawnego określenia zakresu badań, a także trafnego doboru metod badawczych. Umożliwiły również odpowiedni dobór rodzaju próbek badanych (zróżnicowana grubość: 3; 4; 5; 6 lub 8mm i różna liczba warstw tkaniny węglowej: 2; 4; 5; 6; 8; 9; 10; 12; 14 lub 19 warstw), sposobu ich wykonania, a także dobór próbek wykonanych z kompozytu epoksydowo-szklanego i próbek w postaci odlewów z żywicy epoksydowej, służących do badań pomocniczych.

Istotnym elementem rozprawy było zaprojektowanie i wykonanie przez Doktoranta oryginalnego stanowiska badawczego, wyposażonego w układ ogrzewający impulsowo próbkę badaną z regulacją czasu działania i intensywności impulsu cieplnego, układ mocowania próbki oraz układ rejestracji obrazów termograficznych zawierający specjalistyczną kamerę termowizyjną wraz z komputerowym systemem rejestracji, zapisu i gromadzenia danych.

Najważniejszym elementem pierwszego etapu badań (poza wyznaczeniem zawartości włókien metodą analityczną i metodą znormalizowaną, co jest badaniem standardowym) był dobór warunków wymuszenia cieplnego. W badanym układzie zależą one od trzech zmiennych: czasu trwania impulsu cieplnego, temperatury źródła impulsu cieplnego i odległości tego źródła od powierzchni próbki badanej. Przyjęto także warunki brzegowe tych badań, zgodnie z którymi wzrost temperatury na powierzchni próbki przeciwległej do powierzchni ogrzewanej nie powinien przekraczać 10°C , a temperatura w każdym miejscu próbki nie może osiągać temperatury destrukcji badanego materiału kompozytowego. W pierwszej części tego etapu, kierując się wynikami badań wstępnych, przyjęto wartości zadane poszczególnych zmiennych, które wynosiły odpowiednio: (1; 2 lub 3 s); (550; 650 lub 750°C) i (20 lub 30 mm).

Uwzględniając wyniki badań etapu pierwszego, dalsze badania termograficzne prowadzono już tylko przy jednej wartości temperatury źródła impulsu cieplnego, wynoszącej $650\pm 2^{\circ}\text{C}$ i takich samych (jak w etapie pierwszym) wartościach zadanych pozostałych zmiennych. Na podstawie przebiegu zależności temperatury od czasu, rejestrowanej za pomocą kamery termowizyjnej i sprowadzonej następnie do postaci bezwymiarowej, obliczono dyfuzyjność cieplną próbek badanych. Wyniki obliczeń umożliwiły określenie zależności między dyfuzyjnością cieplną a zawartością włókien w próbkach o poszczególnych grubościach (tzn. 3; 4; 5; 6 lub 8 mm). Aproksymując uzyskane wyniki otrzymano tzw. funkcje obiektów badań, będące równaniami liniowymi o różnych wartościach współczynników kierunkowych i wyrazów wolnych, stanowiące analityczny zapis badanej zależności. Zastosowano procedury obliczeniowe wynikające ze znanej metody

obliczania dyfuzyjności cieplnej (opracowanej przez W.J. Parkera i współpracowników na początku lat sześćdziesiątych XX w. i później wielokrotnie modyfikowanej) oraz z normy PN-EN 821-2:2002. W ramach tych procedur przeprowadzono także analizę i ocenę statystyczną uzyskanych wyników, które potwierdziły, że funkcje obiektów badań dobrze opisują rezultaty badań eksperymentalnych.

Postępując w podobny sposób zbadano również wpływ grubości próbek na wartość dyfuzyjności cieplnej. W tym przypadku przedmiotem badań były próbki o różnej grubości (od 3,31 do 8,09 mm), wykonane w postaci odlewów z żywicy epoksydowej. Na podstawie wyników tych badań stwierdzono, jak ze wzrostem grubości próbki badanej wzrasta dyfuzyjność cieplna. Jest to istotne ze względów merytorycznych, gdyż dowodzi, że grubość badanego kompozytu jest zmienną niezależną, wpływającą na wartość dyfuzyjności cieplnej.

W końcowej części rozprawy, korzystając z wcześniej przeprowadzonych eksperymentów i wyników obliczeń, skonstruowano tzw. modele diagnostyczne, w postaci równań liniowych, w których zmienną niezależną jest dyfuzyjność cieplna, a zmienną zależną zawartość włókien w badanym kompozycie. Modele te uzyskano w wyniku przekształcenia funkcji obiektów, polegającego na zamianie rolami zmiennych niezależnej i zależnej, występujących w tych funkcjach. **Przyjęcie takiego sposobu postępowania dla potrzeb zweryfikowania tezy rozprawy jest oryginalnym osiągnięciem Doktoranta.** Wyniki analizy i oceny statystycznej modeli diagnostycznych potwierdziły, że opisują one dobrze zależności zbadane eksperymentalnie, a błędy szacunku zawartości włókien w badanych kompozytach, przeprowadzonego tą metodą, nie przekraczają 3% wartości oszacowanej. Doktorant słusznie zastrzegł, że modele diagnostyczne, opracowane przez Niego, mogą być stosowane w zakresie wartości zmiennych (tzn. zawartości włókna i grubości próbek badanych) objętych eksperymentami wykonanymi w ramach rozprawy.

Opracowanie modeli diagnostycznych, umożliwiających ocenę zawartości włókien w kompozytach epoksydowo-węglowych, ma duże znaczenie poznawcze i użytkowe. Znaczenie poznawcze rozprawy polega głównie na tym, że w jej wyniku, korzystając z nowoczesnej termowizji aktywnej, poznano bliżej wpływ zawartości włókien węglowych na dyfuzyjność cieplną badanych kompozytów, a także opracowano nowy sposób oceny zawartości tych włókien, zweryfikowany rzetelnie podczas eksperymentów i metodami statystyki matematycznej. Koncepcja tego sposobu może być wykorzystana także w innych badaniach naukowych. Znaczenie użytkowe rozprawy polega m.in. na tym, że za pomocą opracowanej w jej ramach metody można przeprowadzać nieniszczące badania materiałów i elementów konstrukcyjnych różnych urządzeń, zbudowanych z kompozytów

epoksydowo-węglowych. Z tych względów **temat oraz zakres recenzowanej rozprawy są określone trafnie pod względem naukowym, technicznym i aplikacyjnym, co zasługuje na wysoką ocenę.**

Cel naukowy rozprawy wiąże się z poznaniem wpływu zawartości włókien w kompozycie epoksydowo-węglowym na dyfuzyjność cieplną tego kompozytu, wyznaczaną metodą termografii aktywnej. Nie stwierdziłem, aby zagadnienie to było przedmiotem publikacji naukowych i dlatego uznaję, że **wyniki badań przedstawione w rozprawie stanowią istotną nowość naukową.** Wykonano je metodami znanymi, korzystając przy tym z istniejących już programów komputerowych i stosując w szerokim zakresie analizę statystyczną.

Zarówno część eksperymentalna, jak i obliczenia oraz konstrukcja modeli diagnostycznych rozprawy zostały wykonane w sposób właściwy. Poprawnie dobrane zostały także poszczególne metody badawcze i związana z nimi aparatura badawcza. **Najważniejszym elementem rozprawy, oprócz konstrukcji i wykonania oryginalnego stanowiska badawczego oraz właściwie przeprowadzonych eksperymentów, jest opracowanie modeli diagnostycznych, stanowiących pozytywną weryfikację tezy badawczej.**

Wartość merytoryczną rozprawy oceniam wysoko, zarówno ze względu na zakres oraz sposób przeprowadzenia badań, jak i ze względu na uzyskane rezultaty oraz ich interpretację. Jako istotne osiągnięcia merytoryczne Doktoranta uznaję:

- Sporządzenie wnikliwego przeglądu aktualnego stanu wiedzy z zakresu objętego tematem rozprawy.
- Zaprojektowanie i budowę oryginalnego stanowiska badawczego, umożliwiającego wykonanie pełnego zakresu badań, co w przypadku prac z dziedziny nauk technicznych jest bardzo ważne i ma często decydujący wpływ na ich wyniki końcowe.
- Sposób konstrukcji modeli diagnostycznych i szerokie wykorzystanie w tym celu metod statystyki matematycznej.
- Dużą dokładność oraz stosunkowo szeroki i jasno określony zakres stosowania opracowanych modeli diagnostycznych.

Uzyskane **wyniki są oryginalne i mają istotne znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne.** Stanowią one ważny wkład Doktoranta w rozwój nauk technicznych, a w szczególności w rozwój inżynierii materiałowej, w zakresie nowoczesnych metod badania

materiałów kompozytowych. Metodyka wykonania badań, uzyskane wyniki oraz sposób ich zaprezentowania i uzasadnienia **świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta i o dobrym przygotowaniu do prowadzenia prac naukowych.**

W rozprawie Doktorant nie ustrzegł się jednak pewnych drobnych nieprawidłowości, do których zaliczam:

- Analizując zastosowania kompozytów epoksydowo-węglowych Doktorant skoncentrował swoją uwagę prawie wyłącznie na konstrukcjach samolotów, co jest pewnym zawężeniem tematu.
- Dane przedstawione na rys.2.1÷2.4 obejmują okresy odpowiednio sprzed dwudziestu pięciu, trzynastu i dwudziestu lat. Mają więc jedynie znaczenie historyczne, a nie prezentują aktualnego stanu omawianych zagadnień.
- Nie wyjaśniono, co znaczy wyrażenie: „zgodnie z regułą mieszanin” (str.18, wiersze 3 i 2 od dołu, także str.20 i dalsze). Można przypuszczać, że dotyczy to m.in. sytuacji opisanej równaniem R_m (krzywej przedstawionej na rys.2.5), co jednak nie zwalnia Doktoranta od obowiązku jednoznacznego wyjaśnienia treści tego wyrażenia.
- Niejednolite stosowanie jednostek temperatury. Zarówno w analizie opisowej (np. str.72÷78), jak i w opisach osi niektórych wykresów (np. rys.5.2÷5.8), jako jednostki temperatury stosowane są zarówno stopnie Celsjusza ($^{\circ}\text{C}$), jak i Kelviny (K).

Jednak wymienione wyżej nieprawidłowości nie mają istotnego wpływu na wartość merytoryczną rozprawy.

5. Uwagi szczegółowe

Nie znalazłem w rozprawie istotnych błędów formalnych, a jedynie pojedyncze błędy literowe. Niewiele jest także nieprawidłowości stylistycznych. Także nieliczne są nieścisłości o charakterze formalnym lub porządkowym, do których zaliczam m.in.:

- Str.6, wiersz 7 od góry: jest „ze względu na swą niszczącą specyfikę” – co to znaczy?
- Str.45, wiersze 7/8 od góry, jest: „dostatecznej informatywności” – co to znaczy?
- Str.54, wiersz 6 od góry, jest: „ceramiki czarnej” – jakie znaczenie ma określenie sformułowane w ten sposób?

- W opisie działania stanowiska badawczego pojawia się nazwa „przysłona czołowa” (str.54, wiersz 6 od dołu), natomiast w opisie rys.4.5, na którym przedstawione jest to stanowisko, występują tylko: „przysłona stała” i „przysłona ruchoma”.
- Niewłaściwe jest oznaczenie osi rzędnych na rys.5.4 i 5.7 (jest: „[K]”; powinno być: „[°C]”).

Przedstawione wyżej nieścisłości nie obniżają poziomu merytorycznego rozprawy.

6. Wnioski końcowe

Podstawowym warunkiem właściwej realizacji celów rozprawy było zaprojektowanie i wykonanie przez Doktoranta stanowiska badawczego, staranne przeprowadzenie badań eksperymentalnych oraz wnikliwa analiza, interpretacja i opis matematyczny uzyskanych wyników. Wymagało to od Doktoranta dużej wiedzy z zakresu mechaniki, inżynierii materiałowej, statystyki matematycznej i planowania doświadczeń. Wymagało to także dużych umiejętności eksperymentalnych, w tym z zakresu termowizji aktywnej. **Według mojej oceny Doktorant spełnił te wymagania bardzo dobrze.**

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter **oryginalnej pracy naukowej**, zawierającej ważne elementy poznawcze i użytkowe. Została ona wykonana i przedstawiona zgodnie z metodologią prowadzenia oraz prezentowania prac naukowych.

Wyniki badań przedstawione w rozprawie umożliwiają lepsze poznanie wpływu zawartości włókien w kompozytach epoksydowo-węglowych na dyfuzyjność cieplną tych kompozytów. Są one ważne ze względu na duże znaczenie i coraz większy zakres stosowania tych kompozytów w wielu dziedzinach techniki. Wyniki badań eksperymentalnych umożliwiły także opracowanie modeli diagnostycznych kompozytów epoksydowo-węglowych, służących do oceny ilościowej zawartości włókien węglowych w tych kompozytach. **Zaprezentowane wyniki stanowią wiarygodną weryfikację prawidłowo sformułowanej tezy badawczej. Potwierdzają także poprawność przyjętych celów badawczych i właściwy dobór zakresu przeprowadzonych badań. Wyniki te są oryginalne i mają istotne znaczenie poznawcze oraz użytkowe.**

Na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej mi do recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Sebastiana Pawlaka pt.: „*Termograficzna metoda oceny rozkładu udziału włókien w kompozytach epoksydowo-węglowych*”, oceniam, że **rozprawa ta spełnia wszystkie warunki** określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i

tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 16 marca 2003 r., poz. 595). Upoważnia mnie to do przedstawienia wniosku o dopuszczenie Pana mgr. inż. Sebastiana Pawlaka, po spełnieniu pozostałych wymogów, do publicznej obrony tej rozprawy.

Jednocześnie, uwzględniając oryginalność, wysokie walory merytoryczne oraz staranne opracowanie tekstu recenzowanej rozprawy, wnioskuję o jej wyróżnienie.

/Prof. dr hab. inż. Marian Żenkiewicz/