



Leszek A. DOBRZAŃSKI

M. Dr h.c. prof. zw. dr hab. inż.

Dyrektor Instytutu
Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

Wydział Mechaniczny Technologiczny

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ul. Konarskiego 18a

44-100 GLIWICE

Gliwice, 25 września 2010 roku

PN
[Signature]

RECENZJA

pracy doktorskiej

Pana mgra inż. Sebastiana PAWLAKA

pod tytułem

*„Termograficzna metoda oceny rozkładu zawartości włókien
w kompozytach epoksydowo-węglowych”*

wykonanej pod opieką promotora Pana Prof. dra hab. inż. Gabriela Wróbla,

opracowana na zlecenie Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego

Politechniki Śląskiej w Gliwicach

(pismo RMT0-675/D/006/09/10 z dnia 19.07.2010 roku

Dziekana Pana Prof. zw. dra hab. inż. Jerzego Świdra)



Wśród materiałów kompozytowych dużym zainteresowaniem cieszą się materiały epoksydowo-węglowe, głównie ze względu na relatywnie dużą wytrzymałość właściwą, jako stosunek wytrzymałości do gęstości, co ma szczególne znaczenie w przemyśle lotniczym, a systematyczne obniżanie się ceny włókien węglowych na rynkach światowych, sprzyja również zwiększeniu zastosowania tych materiałów w innych gałęziach przemysłu. Własności mechaniczne materiałów kompozytowych wzmacnianych włóknami w znacznej mierze są uzależnione od udziału objętościowego materiału wzmacniającego, osiągając wartości maksymalne przy ściśle określonym udziale, powyżej którego własności te obniżają się, ze względu na brak możliwości nasączenia ich ciekłą żywicą. W celu zapewnienia pożądanych własności, już w trakcie projektowania elementów wytwarzanych z takich materiałów kompozytowych należy ustalić udział włókien, niekiedy nawet zmieniający się w różnych miejscach elementu, gdy konieczne jest uzyskanie różnych własności w różnych miejscach wytwarzanego produktu. Odchylenia od założonego udziału włókien wzmacniających, które mogą powstać podczas wytwarzania, zwłaszcza podczas prasowania

tlócznego lub formowania z wtłaczaniem żywicy (RTM z j.ang. *Resin Transfer Moulding*), wywołują niekontrolowane lub niemożliwe do identyfikacji zmiany własności gotowych produktów, związane z działaniem ciśnienia lub podciśnienia i przepływem żywicy w formie. Możliwość przemieszczania się warstw wzmocnienia podczas formowania wymaga ścisłej kontroli poprodukcyjnej rozkładu udziału włókien w gotowych produktach. Metody niszczące udział włókien objęte normami nie mogą być przydatne w przemyśle lotniczym, co stwarza konieczność opracowania efektywnej metody nieniszczącej wyznaczania rozkładu udziału włókien w epoksydowo-węglowych materiałach kompozytowych. Do nieniszczących metod wykrywania wad materiałowych powstałych podczas wytwarzania lub uszkodzeń powstałych podczas eksploatacji materiałów kompozytowych epoksydowo-węglowych takich jak: delaminacje, pęknięcia, uszkodzenia wywołane uderzeniem, uszkodzenia typu zmęczeniowego, często stosowana jest termografia aktywna. Rozwój termografii aktywnej spowodowany jest w znacznej mierze zapotrzebowaniem branży lotniczej na bezdotykową i efektywną metodę badań elementów kompozytowych o dużych gabarytach. W przypadku wad powstałych podczas wytwarzania, najczęściej uwagi poświęca się określaniu efektywności metody do detekcji obcych wtrąceń lub pustek, w zależności od ich wielkości i usytuowania w badanym materiale kompozytowym. Brak natomiast doniesień na temat możliwości zastosowania termografii aktywnej do wyznaczania rozkładu udziału włókien w kompozytowych materiałach warstwowych epoksydowo-węglowych, co stało u podstaw podjęcia przez Doktoranta w ramach opiniowanej pracy doktorskiej działań metodycznych w tym zakresie. Na podstawie analizy literatury oraz wyników badań wstępnych sformułował tezę swej pracy w następującym brzmieniu: *„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.”* Zasadniczym celem poznawczym opiniowanej pracy doktorskiej jest określenie wpływu udziału włókien w materiałach kompozytowych epoksydowo-węglowych na wybrany wskaźnik nieustalonego przepływu ciepła, wyznaczany podczas badań termograficznych metodą aktywną. Celem użytecznym tej pracy jest natomiast opracowanie nowej, nieniszczącej metody badań rozkładu udziału włókien w tej grupie materiałów inżynierskich z wykorzystaniem termografii aktywnej wraz z budową oryginalnego stanowiska badawczego, określeniem warunków badań, ocena zakresu stosowalności oraz obszaru efektywności metody na podstawie wyników wykonanych badań eksperymentalnych. Należy podkreślić celowość podjęcia tematyki badawczej objętej opiniowaną pracą doktorską, uznając ją za oryginalną i dającą szansę na opracowanie nowatorskich rozwiązań metodycznych, o dużym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym. Ze względu na tematykę badawczą opiniowana praca doktorska, stanowiąca element wieloletnich

działań naukowych i prac wdrożeniowych wykonywanych w Zakładzie Przetwórstwa Materiałów Metalowych i Polimerowych Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej pod kierunkiem Pana Prof. dra hab. inż. Gabriela Wróbla, bez wątplenia dotyczy dyscypliny naukowej „*Inżynieria Materiałowa*”, wobec czego może być rozpatrywana przez Radę Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach, która ma pełne uprawnienia do nadawania stopni naukowych m.in. w tej dyscyplinie naukowej.

Opiniowana praca doktorska Pana mgra inż. Sebastiana Pawlaka ma układ klasyczny. Zawiera 112 stronice wydruku komputerowego oraz 3 załączniki zawierające głównie wykresy i tablice. Pierwszą częścią opiniowanej pracy doktorskiej P. mgra inż. Sebastiana Pawlaka jest 2-stronicowy wstęp, zawierający opis genezy pracy oraz wskazujący na celowość jej realizacji. W kolejnym rozdziale, zatytułowanym Przegląd literatury, liczącym 35 stronice opisano materiały kompozytowe epoksydowo-węglowe wraz z przykładami ich zastosowań w przemyśle lotniczym, wpływ udziału włókien na wybrane własności materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej, wybrane metody oceny udziału włókien w tych materiałach, termograficzne metody badań ze wskazaniem możliwości ich zastosowania w dziedzinie nieniszczących badań materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej, pomiary dyfuzyjności cieplnej materiałów inżynierskich. Zakończono go podsumowaniem przeglądu literatury, w którym wskazano na znaczący wpływ udziału włókien na niemal wszystkie własności materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej i konieczność jego kontroli w trakcie oceny jakości gotowych produktów wykonanych z tych materiałów, a także wskazując że do wyznaczania udziału włókien najczęściej wykorzystuje metody znormalizowane, polegające na wypalaniu, rozpuszczaniu lub wytrawianiu polimerowej osnowy, a następnie określeniu udziału włókien jako pozostałości nieulegającej zniszczeniu, co w oczywisty sposób nie może być stosowane w przypadku konieczności wykonania 100-procentowej kontroli jakości całej partii produktów. Z tych względów wielokrotnie stosowano do tego celu różne znane metody badań nieniszczących, w tym radiografię, ultrasonografię, fotometrię, promieniowanie β , chociaż nie zanotowano zastosowania termografii aktywnej, co uzasadnia celowość podjęcia badań w tym zakresie. Literatura poświęcona termograficznym badaniom polimerowych materiałów kompozytowych jest bardzo obszerna, ale jednocześnie obejmuje wąską grupę zagadnień, głównie dotyczących identyfikacji wad materiałowych, przy czym wśród badanych materiałów kompozytowych, zdecydowanie najwięcej uwagi poświęcono materiałom epoksydowo-węglowym o największym zastosowanie w przemyśle lotniczym, wykazującym duże zapotrzebowanie na bezdotykową i efektywną nieniszczącą metodę badań elementów o znacznych rozmiarach, co równocześnie wskazuje na celowość podjęcia wymienionej tematyki badawczej i to nie tylko dla oceny wad materiałowych, lecz również dla ilościowej oceny udziału włókien w kompozytowych materiałach epoksydowo-węglowych. Wykonane studia literaturowe wskazują nie tylko na erudycję Autora opiniowanej pracy doktorskiej, lecz również uzasadniają tezy opiniowanej pracy

doktorskiej w uprzednio podanym brzmieniu oraz do kreślenia zakresu pracy, co Autor przedstawił w kolejnym 1-stronicowym rozdziale zatytułowanym Teza i cele rozprawy. W kolejnym 23-stronicowym rozdziale zatytułowanym. Badania własne, zawierającym program badań, opis materiału do badań, koncepcji i budowy stanowiska do badań termograficznych, zakresu i metodyki badań opracowaniem modeli diagnostycznych do wyznaczenia rozkładu udziału włókien w badanych materiałach właznie. Najistotniejsze z punktu widzenia osiągnięć Doktoranta są rozdziały 5. Wyniki badań i ich omówienie, liczący 32 strony i 6. Podsumowanie i wnioski, liczący 4 strony. Opis wyników badań zawiera części dotyczące wyników badań i obliczeń udziału włókien w badanych materiałach, wyników doboru warunków wymuszenia cieplnego, wyników badań termograficznych, wyników analizy termogramów, wyników opracowania modeli diagnostycznych do wyznaczenia rozkładu udziału włókien w badanych materiałach kompozytowych. Na zakończenie pracy sformułowano 6 wniosków, które raczej stanowią zwięzłe syntetyczne podsumowanie pracy, niż rzeczywiste wnioski z wykonanych badań. Prace poprzedza spis treści, w mej ocenie zbyt rozbudowany, w wyniku czego krytycznie oceniam strukturę opiniowanej pracy doktorskiej, podzielonej na zbyt dużą liczbę bardzo krótkich rozdziałów, co paradoksalnie nie ułatwia lektury pracy. Pracę kończy spis literatury, obejmujący 120 pozycji, w tym wielu wydanych w bieżącym dziesięcioleciu oraz równie wielu w języku angielskim oraz zawierający po kilka katalogów firmowych i norm przedmiotowych, bardzo dobrze dobranych ze względu na poruszoną w pracy tematykę badawczą, po którym zamieszczono streszczenia pracy doktorskiej w języku polskim i angielskim, a także załączniki A, B i C.

Konsekwencją założeń przyjętych przez Pana mgr inż. Sebastiana Pawlaka jest metodologiczny zakres osiągnięć Doktoranta. Założonym efektem badań eksperymentalnych wykonanych w opiniowanej pracy doktorskiej, na stanowisku badawczym zaprojektowanym i zbudowanym przez Doktoranta było uzyskanie wyników wykorzystanych do opracowania modeli diagnostycznych wiążących wybrany wskaźnik nieustalonego przepływu ciepła z udziałem włókien w badanych materiałach kompozytowych. Programem badań objęto materiały o różnej grubości i różnym udziale włókien wzmacniających wykonane metodą kontaktową o powierzchni 100 x 100 mm. Badania termograficzne metodą aktywną przy odpowiednio dobranych eksperymentalnie warunkach wymuszenia cieplnego, zapewniających ustalony wzrost temperatury na przeciwległej do nagrzewanej powierzchni próbki nie powodującej jednak destrukcji badanego materiału, po serii wstępnej nad doбором odpowiednich warunków wymuszenia cieplnego, miały na celu wyznaczenie charakterystyk czasowo-temperaturowych, które wykorzystano do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej badanych materiałów metodą impulsu cieplnego. Stwierdzono, że grubość próbki ma wpływ na uzyskany wynik dyfuzyjności cieplnej, wobec czego wyznaczano tzw. dyfuzyjność cieplną pozorną (z j.ang. *apparent thermal diffusivity*). Wystarczające okazało się wyznaczenie wartości względnych dyfuzyjności w warunkach wykonanego eksperymentu dla wyznaczenia

zależności pomiędzy dyfuzyjnością cieplną a udziałem włókien w badanych materiałach kompozytowych. W celu porównania wyników badań termograficznych i sprawdzenia wpływu grubości próbki na uzyskane wyniki pomiarów dyfuzyjności cieplnej przygotowano również próbki z samej żywicy epoksydowej (odlewy epoksydowe) o grubościach odpowiadających grubości próbek epoksydowo-węglowych. Opracowano modele diagnostyczne ilościowej oceny rozkładu udziału włókien w badanych materiałach w zakresie grubości 3-8 mm, w postaci równań liniowych różniących się między sobą wartościami współczynników. W celu ujęcia ilościowego wyników badań termograficznych konieczne jest wykonywanie analizy opartej na wyznaczaniu dyfuzyjności cieplnej w wybranych miejscach analizowanego materiału kompozytowego. Wykonane badania i obliczenia doprowadziły Doktoranta do wniosku, że opracowana metoda termografii aktywnej może być zastosowana do ilościowej oceny rozkładu udziału włókien w materiałach kompozytowych warstwowych epoksydowo-węglowych, gdyż opracowane funkcje wskazują, że dyfuzyjność cieplna zależy od udziału włókien węglowych, nie wykazując wrażliwości na zastosowane warunki wymuszenia cieplnego. Wykazano zatem, że na podstawie pomiarów termograficznych metodą aktywną można w sposób jednoznaczny ustalić fragment materiału kompozytowego warstwowego epoksydowo-węglowego o niejednorodnym rozkładzie udziału włókien. Opracowane modele diagnostyczne mogą być wykorzystywane w praktyce badań nieniszczących materiałów kompozytowych epoksydowo-węglowych o udziale objętościowym włókien 8÷34% w zależności od grubości próbek pomiarowych. Należy wskazać, że stanowi to istotne osiągnięcie metodyczne i badawcze Doktoranta, stanowiące Jego znaczący wkład do rozwoju inżynierii materiałowej, jako uprawianej przez Niego dyscypliny naukowej. Dla rozszerzenia zakresu stosowalności metody celowa jest jednak kontynuacja badań nad materiałami kompozytowymi epoksydowo-węglowymi wykonanymi innymi metodami, umożliwiającymi uzyskanie znacznie większego udziału włókien. Ze względu na oddziaływanie warunków brzegowych, wyznaczanie rozkładu w strefach o zmiennym udziale włókien, ograniczone jest do obszarów, w których efekt ten nie występuje, co również wymaga dalszych badań.

W mej ocenie opiniowana praca doktorska Pana mgra inż. Sebastiana porusza aktualną tematykę badawczą, zawiera elementy nowości metodologicznej, oryginalną konstrukcję stanowiska badawczego oraz wiele interesujących i wartościowych wyników badań w określonym obszarze dotyczącym materiałów kompozytowych warstwowych epoksydowo-węglowych, z zamiarem wykorzystania jej wyników w przemyśle lotniczym. Należy podkreślić staranną formę graficzną pracy oraz wysoki poziom opanowania przez Doktoranta technik komputerowych wspomagania badań naukowych i edycji prac naukowych. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo duży nakład pracy wniesionej przez Doktoranta dla osiągnięcia założonych celów badawczych oraz opanowanie przez Niego bardzo nowoczesnych metod badawczych. Ogólnie bardzo pozytywnie oceniam całość dokonań Doktoranta zaprezentowanych w opiniowanej pracy doktorskiej.

Oczywiście, jak zwykle, Doktorant nie ustrzegł się wad w trakcie przygotowywania pracy doktorskiej. Analiza danych literaturowych aczkolwiek bardzo kompetentna, co podkreśliłem już poprzednio, opiera się na danych rynkowych z minionego wieku i ogranicza się dosyć konsekwentnie, aczkolwiek niecałkowicie słusznie, do zastosowań badanych materiałów kompozytowych warstwowych epoksydowo-węglowych w lotnictwie. Oczekuję, że w czasie publicznej obrony pracy doktorskiej Doktorant przedstawi bardziej współczesne oraz szersze ze względu na zastosowania dane literaturowe w odpowiedzi na niniejszą uwagę. Niestety występują także błędy literowe i niezręczności językowe, których jednak jest stosunkowo niewiele. Przez nieuwagę Autor nie ujednolicił także na rysunkach wymiarów temperatury ($^{\circ}\text{C}$ i K). Występują także błędy w zakresie nazewnictwa, z których niektóre rażą mnie i w mej ocenie czynią opis w wielu miejscach niejednoznacznym. Począwszy od tytułu pracy (który przecież zatwierdziła Rada Wydziału i nie Autor ponosi za to odpowiedzialność) zamiast pojęcia udział stosowane jest zawartość (choć niekiedy Doktorant używa prawidłowego określenia np. na rys. 2.5 str. 15), zamiast materiały kompozytowe o osnowie polimerowej Autor w uproszczeniu, a może wręcz żargonowo, pisze o kompozytach polimerowych (choć niekiedy Doktorant używa prawidłowego określenia np. na str. 12 wiersz 5g), zamiast o wzmocnieniu pisze Autor o zbrojeniu (np. str 7 wiersz 4g, chociaż niekiedy Doktorant używa prawidłowego określenia np. na str. 5 wiersz 8g),, zamiast własności używa określenia charakterystyki (choć niekiedy Doktorant używa prawidłowego określenia np. na str. 5 wiersz 5d), pisze o ilości zamiast o liczbie (np. str. 13 wiersz 4d, chociaż niekiedy Doktorant używa prawidłowego określenia np. na str. 98 wiersz 7d) lub o udziale (np. str. 14 wiersz 9d), niewłaściwie używa pojęcia rząd (np. str. 26 wiersz 5g), zamiast produkt lub wytwór Autor pisze wyrób (np. na str. 5 wiersz 17g), zamiast o gęstości pisze o ciężarze właściwym (np. na str. 5 wiersz 4g, chociaż niekiedy Doktorant używa prawidłowego określenia np. w tabl. 2.3 na str.10), niewłaściwie stosuje pojęcie różnicy procentowej (chodzi najpewniej o wymiar wyrażony w %, np. tabl. C.9 str. 156) i jeszcze wiele innych podobnych nieścisłości terminologicznych można spotkać w pracy. Sądzę, że jako Wychowanek Śląskiej Szkoły Inżynierii Materiałowej o 65-letniej już tradycji, powinien respektować Jej osiągnięcia, w tym również wkład w kształtowanie polskiego słownictwa technicznego, zawarte m.in. w książkach mego autorstwa wielokrotnie wydanych przez Wydawnictwa Naukowo-techniczne w Warszawie oraz w Wydawnictwie Politechniki Śląskiej, czego nie uczynił, pomimo że jedną z tych książek, może nawet fundamentalną, zacytował w swej pracy doktorskiej jako 1. pozycję. Zwykle uwag dotyczących nazewnictwa nie zamieszczam w opracowywanych przeze mnie recenzjach, ale ze względu na skalę zjawiska uważam, że tym razem należało podnieść tę sprawę, choć oczywiście nie może ona w znaczącym stopniu wpłynąć na obniżenie wysokiej oceny opiniowanej pracy doktorskiej. Pomimo innych uwag szczegółowych, które dotyczą opiniowanej pracy, najczęściej

jednak dyskusyjnych (np. brak analizy błędów pomiarowych, brak statystycznego planowania eksperymentu), nie zgłaszam konkretnych zastrzeżeń.

Podsumowując niniejszą recenzję, biorę pod uwagę, że w opiniowanej pracy doktorskiej pod tytułem „Termograficzna metoda oceny rozkładu zawartości włókien w kompozytach epoksydowo–węglowych” Pan mgr inż. Sebastian Pawlak wykazał, że:

- *jest bardzo dobrze zorientowany w poruszanej w literaturze problematyce dotyczącej warstwowych materiałów kompozytowych epoksydowo–węglowych oraz termograficznych metod badań, zwłaszcza w odniesieniu do nieniszczącej oceny wad materiałowych i ilościowej oceny udziału włókien w materiałach kompozytowych o osnowie polimerowej, wykazując się dużą erudycją w tym zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria Materiałowa”,*
- *pozyskał umiejętności stawiania problemów badawczych i odpowiedniego doboru komplementarnego zestawu metod badawczych i obliczeniowych oraz ich pełnego opanowania praktycznego, jak również samodzielnie zaprojektował i wykonał oryginalne stanowisko badawcze,*
- *osiągnął wartościowe i oryginalne wyniki badań, dotyczące aplikacji metod termografii czynnej do ilościowej oceny udziału włókien w warstwowych materiałach kompozytowych epoksydowo–węglowych, o istotnym znaczeniu metodologicznym, poznawczym i praktycznym, wykazując się istotnym wkładem naukowym w rozwój uprawianej przez Niego dyscypliny naukowej „Inżynieria Materiałowa”,*
- *opanował umiejętności opracowania wyników wykonanych badań oraz syntezy osiągniętych rezultatów badawczych,*

wobec czego z pełnym przekonaniem stwierdzam, że opiniowana praca doktorska spełnia wszelkie wymagania określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U. nr 65 z dnia 16.04.2003 poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach o dopuszczenie Pana mgr inż. Sebastiana Pawlaka do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę szczególnie wartościowe wyniki poznawcze i metodologiczne opiniowanej pracy doktorskiej, wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr inż. Sebastiana Pawlaka przez Radę Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

