

Prof. hab. inż. Jan Taler
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Al. Jana Pawła II 37
31-864 Kraków

Kraków, 20.10.2014 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Łukasza Matysiaka pt. "Experimental Analysis and Inverse
Approach in Numerical Modelling of Curing Process of Composite
Materials,,**

1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa napisana w języku angielskim składa się z 7 rozdziałów, spisu oznaczeń, spisu literatury, załącznika, oraz streszczeń w języku angielskim i polskim. Objętość pracy wynosi 164 strony. Spis literatury zawiera 97 pozycji.

Przedmiotem rozprawy jest symulacja komputerowa utwardzania żywic epoksydowych oraz utwardzania materiałów kompozytowych na bazie tych żywic. Na podstawie czasowych przebiegów temperatury mierzonych w 8 lub 10 punktach leżących wewnątrz obszaru wypełnionego żywicą wyznaczone zostały nieznane parametry występujące w równaniu opisującym proces utwardzania żywicy. Do wyznaczenia nieznanych współczynników zastosowano metodę globalną polegającą na uwzględnieniu w metodzie najmniejszych kwadratów wszystkich temperatur mierzonych w punktach leżących wewnątrz analizowanego obszaru wypełnionego żywicą zapisywanych w zadanych odstępach czasowych. Tematyka pracy jest aktualna.

W rozdziale pierwszym stanowiącym wstęp scharakteryzowano krótko przedmiot rozprawy podkreślając dobre własności izolacyjne żywic epoksydowych z dodatkiem wypełniaczy nieorganicznych, stosowanych w celu ich utwardzenia. W celu uniknięcia sedymentacji wypełniacza podczas procesu utwardzania, która skutkuje niepożądaną

niejednorodnością właściwości fizycznych izolacji, stosowane są izolacje kompozytowe wytworzone z papieru marszczonego impregnowanego żywicą epoksydową.

Przegląd literatury przeprowadzony został w paragrafie 1.2. Krótko omówione zostały techniki eksperymentalnego wyznaczania kinetyki reakcji utwardzania. Scharakteryzowane zostały również różne procedury odwrotne opublikowane przez innych badaczy, w tym stosowane do identyfikacji właściwości termofizycznych żywicy epoksydowej i włókien węglowych. Do minimalizacji funkcji celu w jednej z opublikowanych prac zastosowany został algorytm genetyczny (Skordos et al.).

W ostatnich dwóch paragrafach wstępu przedstawione zostały odpowiednio cel i zakres pracy.

Przepusty elektryczne omówione zostały krótko w rozdziale drugim. Przedstawiona została budowa i wytwarzanie wysokonapięciowych przepustów elektrycznych, w których izolacja wykonana jest z impregnowanego żywicą papieru marszczonego. Izolacja elektryczna rdzenia kondensatora w przepuście elektrycznym składa się z papieru marszczonego, folii aluminiowej i żywicy epoksydowej, której udział w całej masie kondensatora wynosi około 80%. Omówione zostały również podstawowe właściwości żywic epoksydowych. Papier karbowany stosowany jest jako wypełnienie o porowatości około 80%, poprawiające właściwości elektryczne i mechaniczne izolacji. Przedstawiono również technologię impregnacji rdzenia kondensatora przepustu elektrycznego przy użyciu żywicy epoksydowej.

Przedmiotem rozdziału trzeciego jest równanie kinetyki egzotermicznej reakcji utwardzania żywicy przedstawiające zależność pierwszej pochodnej po czasie ze stopnia utwardzenia od stopnia utwardzenia i temperatury. Znając szybkość zmian stopnia utwardzenia żywicy, całkowite ciepło reakcji utwardzania (entalpię reakcji), oraz gęstość żywicy można wyznaczyć jednostkową moc objętościowego źródła ciepła jako funkcję temperatury i stopnia utwardzenia. W rozprawie zaproponowano złożoną postać funkcji (funkcja (3.10)) opisującej kinetykę reakcji zawierającą dziewięć współczynników, które są wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych. W paragrafie 3.2 omówiono wyznaczanie entalpii reakcji i równania kinetyki reakcji za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej, a w paragrafie 3.3 przedstawione zostało wyznaczanie stałych w równaniu kinetyki reakcji, entalpii reakcji oraz niektórych stałych we właściwościach fizycznych jako zadanie odwrotne. Nieznane parametry wyznaczone są za pomocą metody najmniejszych kwadratów tak, aby suma kwadratów różnic temperatur zmierzonych i obliczonych w wybranych punktach przestrzennych i czasowych była minimalna. Minimum sumy

kwadratów wyznaczane było metodą Levenberga-Marquardta lub metodą roju cząstek. Liczba danych pomiarowych (temperatur zmierzonych) wynosi $K \cdot L$, gdzie K jest liczbą punktów, w których mierzona jest temperatura żywicy a L liczbą punktów czasowych, w których mierzona była temperatura. Temperatura żywicy w każdym punkcie przestrzennym i czasowym obliczana była za pomocą programu ANSYS-Fluent. Następnie omówiono metodę roju cząstek i metodę Levenberga-Marquardta, które zostały zastosowane do wyznaczania wartości nieznanymi parametrów, przy których suma kwadratów jest minimalna.

W obszernym rozdziale czwartym zastosowano obydwie metody optymalizacyjne do wyznaczania nieznanymi współczynników dla sztucznie wygenerowanych danych pomiarowych (eksperyment wirtualny). Dane pomiarowe (temperatury) wygenerowano dla modelu kinetyki reakcji wyznaczonego za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej (RKS), a następnie za pomocą metody najmniejszych kwadratów wyznaczono stałe w równaniu kinetyki reakcji. Jeżeli procedura odwrotna działa poprawnie to wyznaczone stałe powinny być równe stałym otrzymanym za pomocą metody RKS, tj. równe danym wejściowym. W paragrafie 4.2 opisano symulację komputerową procesu utwardzania żywicy za pomocą programu ANSYS-Fluent. Na model matematyczny składają się równania zachowania masy, pędu (równania Naviera-Stokesa) oraz równanie zachowania energii. Dodatkowo uwzględniono równanie zachowania dla stopnia utwardzenia żywicy oraz równania konstytutywne, w tym równanie na jednostkową gęstość źródeł ciepła, w którym uwzględnione jest równanie kinetyki reakcji utwardzania. Rozwiązywano sprzężone zagadnienie wymiany ciepła polegające na jednoczesnym wyznaczaniu nieustalonego pola temperatury w aluminiowej formie oraz znajdującej się w jej wnętrzu w stanie ciekłym żywicy. Przepływ żywicy wewnątrz formy, wywołany różnicą jej gęstości wewnątrz analizowanego obszaru, modelowano jako przepływ laminarny płynu nieściśliwego. Na zewnętrznej powierzchni formy aluminiowej zadano warunek brzegowy pierwszego rodzaju. Temperaturę aluminiowej formy, która zmienia się w czasie oraz na powierzchni formy wyznaczono na podstawie temperatur mierzonych na zewnętrznej powierzchni formy. Przyjęto, że zagadnienie jest osiowo-symetryczne. Sztuczne dane pomiarowe generowano w ośmiu punktach, z których pięć usytuowanych było w osi analizowanego układu lub jej pobliżu, a trzy pozostałe punkty znajdowały się w pobliżu cylindrycznej ścianki formy. Właściwości fizyczne materiałów w funkcji temperatury interpolowano linią łamaną (liniowa interpolacja odcinkowa).

Na podstawie sztucznie wygenerowanych danych pomiarowych, tj. na podstawie czasowych przebiegów temperatury, mierzonych w ośmiu punktach usytuowanych wewnątrz

obszaru zajętego przez żywicę wyznaczono sześć parametrów występujących w równaniu kinetyki reakcji utwardzania oraz entalpię reakcji. Z analizy wyników przedstawionych w tabelicy 4.5 wynika, że różnice między wynikami otrzymanymi za pomocą metody Levenberga-Marquardta i metody roju cząstek są znaczne, szczególnie w przypadku współczynników A_2 , m oraz n . Przeprowadzono analizę wpływu uproszczeń w kształcie analizowanego obszaru, gęstości siatki elementów skończonych, warunków brzegowych i zaburzeń danych pomiarowych przypadkowymi błędami na wyniki analizy odwrotnej.

Analiza wrażliwości przeprowadzona w paragrafie 5.6 nie jest zbyt przydatna do wyboru optymalnego położenia punktów pomiaru temperatury, gdyż dla pięciu wyznaczanych parametrów optymalne położenie czujników temperatury jest inne i zmienia się z czasem. Tylko dla czujników nr 3 i 5 można wybrać najbardziej korzystne położenie.

Przedmiotem rozdziału czwartego są badania eksperymentalne procesu utwardzania żywicy. Pokazano wpływ struktury próbki, jej sposobu grzania, wilgotności papieru karbowanego i temperatury formy na czasowe przebiegi zmierzonych temperatur żywicy i formy.

Eksperymentalną weryfikację wyników symulacji utwardzania żywicy jednorodnej i izolacji kompozytowej przedstawiono w rozdziale 6. Oceniono wpływ gęstości siatki i wielkości kroku czasowego na zgodność wyników obliczeń i pomiarów temperatury.

Przedstawione zostały wyniki analizy odwrotnej, za pomocą której wyznaczono 9 współczynników w równaniu kinetyki reakcji oraz entalpię reakcji.

Wnioski i wytyczne dotyczące zakresu dalszych badań procesu utwardzania żywicy zawiera rozdział siódmy.

2. Główne osiągnięcia naukowe

Do głównych osiągnięć mgr inż. Łukasza Matysiaka zaliczyłbym przeprowadzenie badań eksperymentalnych procesu utwardzania żywicy epoksydowej oraz izolacji kompozytowej wytworzonej z impregnowanego papieru marszczonego.

Mgr inż. Łukasz Matysiak przeprowadził symulację komputerową utwardzania żywic epoksydowych przy użyciu programu ANSYS-Fluent oraz przeprowadził obszerną weryfikację eksperymentalną uzyskanych wyników obliczeń. Następnie opracował model matematyczny układu kompozytowego złożonego z impregnowanego papieru marszczonego oraz żywicy epoksydowej. Podobnie jak w poprzednim przypadku uzyskał dobrą zgodność wyników obliczeń i pomiarów.

Mgr inż. Łukasz Matysiak przedstawił również teoretyczno-eksperymentalną metodę wyznaczania nieznanymi współczynników w równaniu kinetyki utwardzania oraz entalpii reakcji. Nieznane współczynniki wyznaczone zostały za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Do wyznaczenia wartości współczynników, przy których suma kwadratów różnic temperatur zmierzonych i obliczonych osiąga minimum zastosowana została metoda Levenberga-Marquardta oraz metoda roju cząstek. Z przeprowadzonych obliczeń i weryfikacji eksperymentalnej wynika, że pierwsza z wymienionych metod jest bardziej odpowiednia do rozwiązania zagadnienia odwrotnego sformułowanego w rozprawie. Opracowana przez kandydata symulacja komputerowa procesu utwardzania żywic epoksydowych jednorodnych i kompozytowych, jak również zaproponowana metoda wyznaczania współczynników w równaniu kinetyki reakcji utwardzania, mają duże znaczenie praktyczne.

Mgr inż. Łukasz Matysiak w pełni udowodnił postawione tezy.

3. Uwagi krytyczne

- Liczba nieznanymi parametrów w równaniu kinetyki reakcji jest równa dziewięć. Dodatkowo wyznaczana jest entalpia reakcji, która stanowi dziesiąty parametr. Wydaje się, że liczba nieznanymi parametrów jest zbyt duża, co utrudnia ich prawidłowe wyznaczenie. Można bowiem dobrać kilkanaście lub kilkadziesiąt zestawów dziesięciu parametrów, dla których suma kwadratów jest bardzo zbliżona do wartości minimalnej. Z moich doświadczeń w rozwiązywaniu parametrycznego zagadnienia najmniejszych kwadratów wynika, że liczba nieznanymi współczynników nie powinna być większa niż pięć lub sześć.
- Z analizy wyników przedstawionych, np. w tablicach 4.5 i 6.9 wynika, że wyznaczone współczynniki różnią się znacznie wartościami, np. współczynnik A_2 wynosi około 400 000 a współczynnik m około 0,5 . Podobnie w tablicy 6.9 różnice w wartościach E_2 i A_2 są bardzo duże. Ponadto optymalne wartości niektórych współczynników są różne dla metody Levenberga-Marquardta i metody roju cząstek. W celu uzyskania prawidłowych wyników należałoby przeprowadzić skalowanie poszukiwanych współczynników aby ich przeskalowane wartości były tego samego rzędu. Skalowanie zmiennych umożliwia wybranie podobnego kroku zmian dla wszystkich współczynników w każdej iteracji. Czy w obliczeniach skalowano poszukiwane współczynniki ?

- Nie wyznaczono 95-cio procentowych przedziałów ufności dla wyznaczonych współczynników. Wyznaczenie tych przedziałów umożliwiłoby wyeliminowanie z równania kinetyki reakcji nieistotnych parametrów, dla których szerokość przedziału ufności jest zbyt duża.
- Dlaczego nie zagęszczano siatki objętości skończonych w pobliżu ścianki gdzie prędkość i temperatura bardzo szybko zmieniają się w kierunku promieniowym ?
- Na stronie 99 przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła aluminium równy 134 W/(mK) podczas gdy aluminium produkowane w hutach ma współczynnik przewodzenia ciepła równy około 205 W/(mK) a aluminium czyste ma jeszcze większy współczynnik przewodzenia ciepła.
- Na rysunku 4.4 i w tablicy 4.2 współrzędna y powinna być zastąpiona współrzędną promieniową r , gdyż analizowany problem jest osiowo-symetryczny.

Wyszczególnione wyżej uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości pracy. Uwagi krytyczne mogą być uwzględnione w dalszych publikacjach Autora.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Matysiaka spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim. Rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Jej realizacja wymagała przeprowadzenia obszernych badań laboratoryjnych. Zaproponowana przez mgr inż. Łukasza Matysiaka symulacja komputerowa procesu utwardzania żywic epoksydowych jednorodnych i kompozytowych oraz procedura wyznaczania nieznanymi współczynników w równaniu kinetyki reakcji i entalpii reakcji bazująca na rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego stanowi jego wkład w poznanie oraz modelowanie matematyczne procesu utwardzania żywic. Przedstawione w rozprawie metody mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowaniu izolacji elektrycznych w wielu urządzeniach stosowanych w elektrotechnice i elektroenergetyce.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Matysiaka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



J. Taler