



Robert SEKUŁA, Krzysztof KASZA, Robert PŁATEK

ABB Centrum Badawcze

## Sekwencyjne modelowanie procesu formowania materiałów utwardzalnych w urządzeniach elektrycznych

**Streszczenie.** Wiele typów urządzeń elektrycznych średniego i wysokiego napięcia wytwarzanych jest przy użyciu technologii formowania reaktywnego z materiałów utwardzalnych (żywicy syntetycznych). Jako przykłady można wymienić tu: przekładniki prądowe i napięciowe, przepusty, bieguny żywiczne. Muszą charakteryzować się odpowiednimi własnościami w zakresie wytrzymałości mechanicznej oraz cieplnej, a przede wszystkim zapewniać bardzo dobrą izolacyjność elektryczną. W referacie przedstawiono sekwencyjne podejście do modelowania zjawiska wytwarzania produktów na bazie żywic epoksydowych z wykorzystaniem formowania reaktywnego. Opisano procedurę trójwymiarowych symulacji wypełniania formy, reakcji utwardzania oraz skurczu żywicy.

**Abstract.** (Sequential modeling of forming process of reactive molding materials in electrical devices). Various MV and HV electrical devices are produced from epoxy resins using reactive molding technology. Current and voltage transformers, bushings, and embedded poles can be mentioned here. They must be characterized by proper mechanical, as well as dielectric properties. In the paper a sequential approach for modeling reactive molding process of thermosetting material has been presented. A procedure for three-dimensional simulations of mold filling, curing kinetics, as well as epoxy shrinkage has been described.

**Słowa kluczowe:** żywice epoksydowe, formowanie reaktywne, utwardzanie, symulacje komputerowe  
**Keywords:** epoxy resins, reactive molding, curing, computer simulations

### Wstęp

Utwardzane na gorąco żywice epoksydowe są szeroko stosowane w wytwarzaniu różnorodnych produktów w przemyśle maszynowym, motoryzacyjnym i lotniczym. Jednakże ze względu na swoje znakomite własności izolacyjne, przy stosunkowo dużej wytrzymałości mechanicznej materiały takie znalazły szczególne zastosowanie w produktach elektrotechnicznych. Można tu wymienić takie wyroby jak: przekładniki prądowe i napięciowe, przepusty, bieguny żywiczne.

W procesie przetwórstwa żywic epoksydowych technologia formowania reaktywnego jest powszechnie stosowana, przy czym w ostatnich latach tzw. odlewanie próżniowe APG (Automated Pressure Gelation). W procesie tym wewnętrzne części danego produktu po uprzednim wygrzaniu umieszcza się w ogrzewanej formie, do której pod odpowiednim ciśnieniem doprowadza się mieszaninę żywiczną. W wyniku dostarczonej energii cieplnej następuje proces wiązania żywicy, który charakteryzuje się silnym efektem egzotermicznym. Po zakończeniu procesu wiązania produkt uzyskuje właściwe własności izolacyjne, ale w celu zredukowania naprężeń wewnętrznych poddawany jest obróbce cieplnej najczęściej poprzez umieszczenie go w piecu tunelowym.

W związku ze złożonością procesu formowania reaktywnego i jego fizyko-chemicznym charakterem, bardzo często powstają wady izolacji w postaci pęknięć, delaminacji, pustek powietrznych. Dlatego też wymagana jest optymalizacja parametrów procesu, do której stosuje się metody prób i błędów, testując różnorodne zestawy parametrów, co jest procedurą bardzo kosztowną w warunkach przemysłowych.

Mając to na uwadze zwrócono się w kierunku możliwości zastosowania różnorodnych metod komputerowych do symulacji przetwórstwa tworzyw sztucznych. Zastosowanie takiego numerycznego podejścia może dostarczyć użytecznych informacji dotyczących potencjalnych problemów towarzyszących wytwarzaniu. Można tu przytoczyć:

- przedwczesne sieciowanie,
- niekompletne wypełnienie wnęki formy,

- lokalne przegrzanie,
- pęknięcia,
- skurcze.

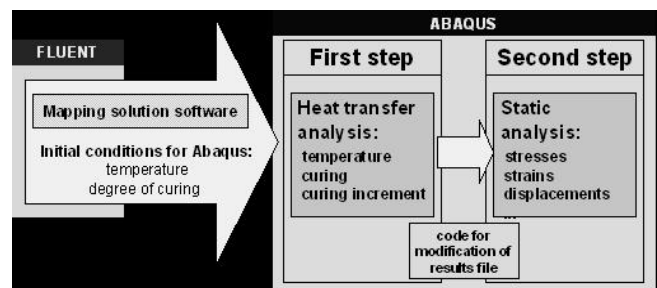
Krakowskie Centrum Badawcze było odpowiedzialne za rozwój w pełni trójwymiarowego narzędzia symulacyjnego do modelowania procesu formowania reaktywnego. Narzędzie [1] zostało w pełni zweryfikowane w przemyśle i jest stosowane już na etapie rozwoju nowych produktów żywiczych.

### Procedura symulacyjna

Opracowane i zaimplementowane w warunkach przemysłowych narzędzie symulacyjne oparte jest na trójwymiarowym komercyjnym pakiecie CFD (Computational Fluid Dynamics) pod nazwą FLUENT. Ze względu na charakter żywicy epoksydowej, zaimplementowano w narzędziu dodatkowe funkcje opisujące zachowanie się materiału podczas ogrzewania:

- model kinetyki reakcji
- model lepkości

Procedura symulacyjna pozwala na modelowanie wszystkich etapów procesu formowania reaktywnego, tzn. wypełniania formy, utwardzania żywicy (łącznie z modelowaniem reakcji egzotermicznej) oraz obróbki cieplnej po wyciągnięciu produktu z formy.



Rys.1. Schemat procedury obliczeń sekwencyjnych Fluent-ABAQUS

Wyniki obliczeń (rozkład temperatury oraz stopień utwardzenia) transferowane są w następnym etapie

obliczeń do innego komercyjnego pakietu symulacyjnego, mianowicie ABAQUS'a (rys.1).

Procedura ta została zautomatyzowana poprzez rozwinięcie własnego kodu mapującego, dzięki czemu zapewniona jest sekwencyjność obliczeń FLUENT-ABAQUS. Należy podkreślić, że w celu przeprowadzenia pełnej analizy strukturalnej został zaimplementowany również w ABAQUS'ie model kinetyki utwardzania żywicy.

### Zastosowane modele

Własności utwardzanej żywicy zależą ściśle od stopnia jej utwardzenia. Dlatego też modelowanie musi być oparte na fakcie, iż lepkość  $\eta$  zależy zarówno od temperatury, jak i stopnia utwardzenia  $\alpha$ . Zależność ta jest wykorzystana w modelu lepkości opracowanym przez Macosko [2], który charakteryzuje się następującą postacią matematyczną:

$$(1) \quad \eta = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \left(\frac{\alpha_{gel}}{\alpha_{gel} - \alpha}\right)^{C_1 + C_2 \alpha}$$

gdzie:  $B$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $T_b$  są stałymi, a  $\alpha_g$  oznacza próg żelowania (0.55÷0.80).

W celu opisu zjawiska utwardzania żywicy zastosowano znany z literatury model Kamal'a [3]:

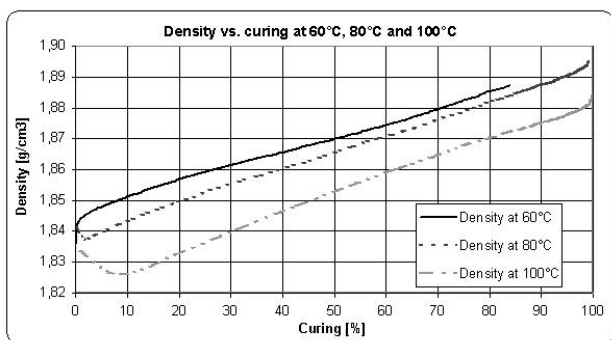
$$(2) \quad \frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n$$

$$(3) \quad k_i = A_i e^{\frac{-E_i}{RT}}$$

gdzie:  $i = 1, 2$ ;  $d\alpha/dt$  - szybkość utwardzania,  $m$ ,  $n$  - stałe,  $k_i$  - stałe kinetyki reakcji,  $A_i$  - stała;  $E_i$  - energia aktywacji,  $R$  - uniwersalna stała gazowa,  $T$  - temperatura.

Wielkość  $m$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $A$  oraz  $E$  wyznacza się przy użyciu różnicowej analizy termicznej (DSC).

Obliczenia strukturalne prowadzone są w sposób sekwencyjny, tzn. w pierwszym etapie przeprowadza się analizę wymiany ciepła (łącznie z kinetyką reakcji), a następnie prowadzona jest analiza naprężeń. Ponieważ proces formowania żywic charakteryzuje się występowaniem oprócz skurczu termicznego, skurczu chemicznego związanego ze zmianą gęstości żywicy w procesie sieciowania opracowano modele skurczu bazując na pomiarach gęstości żywicy w funkcji stopnia utwardzenia i temperatury (rys.2).



Rys.2. Zależność gęstości żywicy od temperatury i stopnia utwardzenia (pomiar)

Dzięki takim pomiarom opracowano funkcję (rys. 3) opisującą wpływ stopnia utwardzenia i temperatury na gęstość żywicy, którą to funkcję można było zaimplementować w oprogramowaniu ABAQUS, co pozwalało na modelowanie zjawiska skurczu.

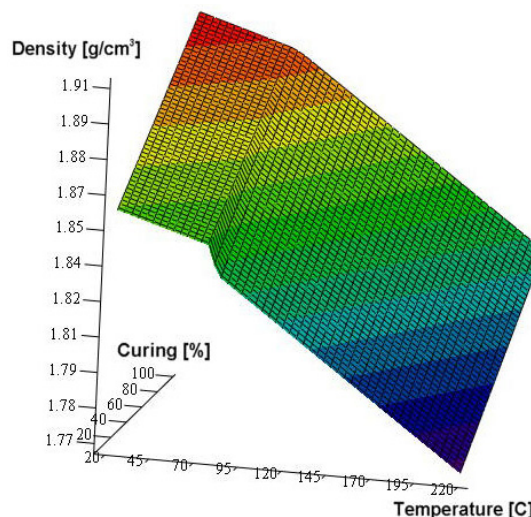
Założono, że przyrost odkształceń w każdym kroku czasowym może być wyrażony jako suma składnika mechanicznego i termicznego:

$$(4) \quad \Delta \varepsilon_{xx}^{Total} = \Delta \varepsilon_{xx}^{Mech} + \Delta \varepsilon_{xx}^{th}$$

Oprogramowanie ABAQUS pozwala na zdefiniowanie składnika termicznego używając funkcję UEXPAN. Składnik ten zastosowano, aby uwzględnić wpływ termiczny i chemiczny, które wpływają na gęstość materiału żywicznego:

$$(5) \quad \Delta \varepsilon_{xx}^{th} = 3 \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} - 1$$

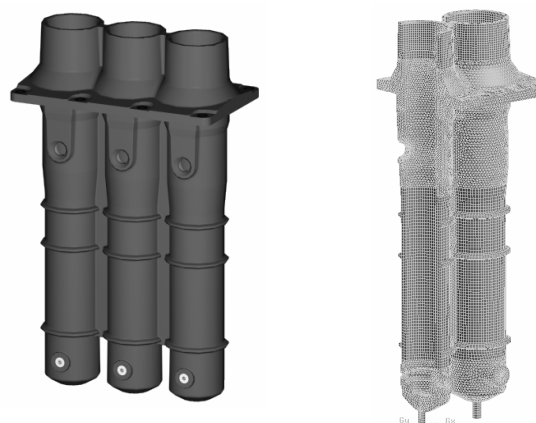
Gdzie:  $\rho'$  oznacza aktualną gęstość, a  $\rho$  jest gęstością z poprzedniego kroku czasowego.



Rys.3. Zależność gęstości żywicy od temperatury i stopnia utwardzenia (zbudowana zależność matematyczna)

### Wybrane wyniki symulacji

Przykładowe wyniki symulacji procesu formowania reaktywnego przedstawiono na przykładzie żywicznej obudowy przekładnika średniego napięcia. Na poniższym rysunku przedstawiono model geometryczny oraz siatkę objętości skończonych (rys.4). Obliczenia przeprowadzono dla procesu odlewania ciśnieniowego.



Rys.4. Model przepustu średniego napięcia oraz siatka objętości skończonych

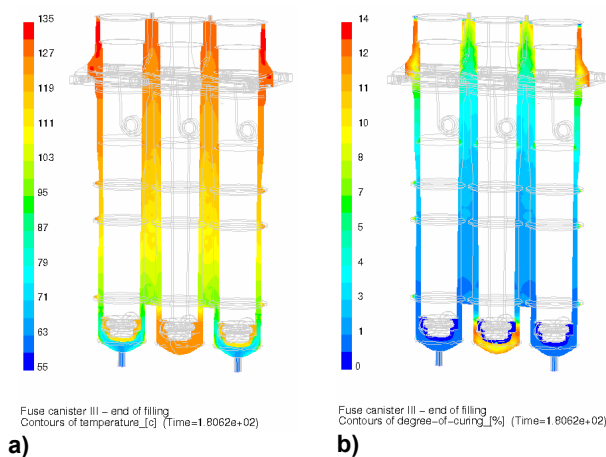
Opracowane narzędzie symulacyjne pozwala na otrzymanie szeregu parametrów, takich jak: rozkład temperatury, ciśnień, prędkości wpływającej żywicy, a co najważniejsze pozwala na uzyskanie informacji o procesie

utwardzania materiału żywicznego i wizualizacji wyników w postaci przebiegu frontu utwardzania. Informacje te pozwalają na dobór takich parametrów procesu, które zapewniają właściwy front utwardzania minimalizując prawdopodobieństwo wystąpienia wad odlewniczych.



Rys.5. Wypełnianie wnętrza formy

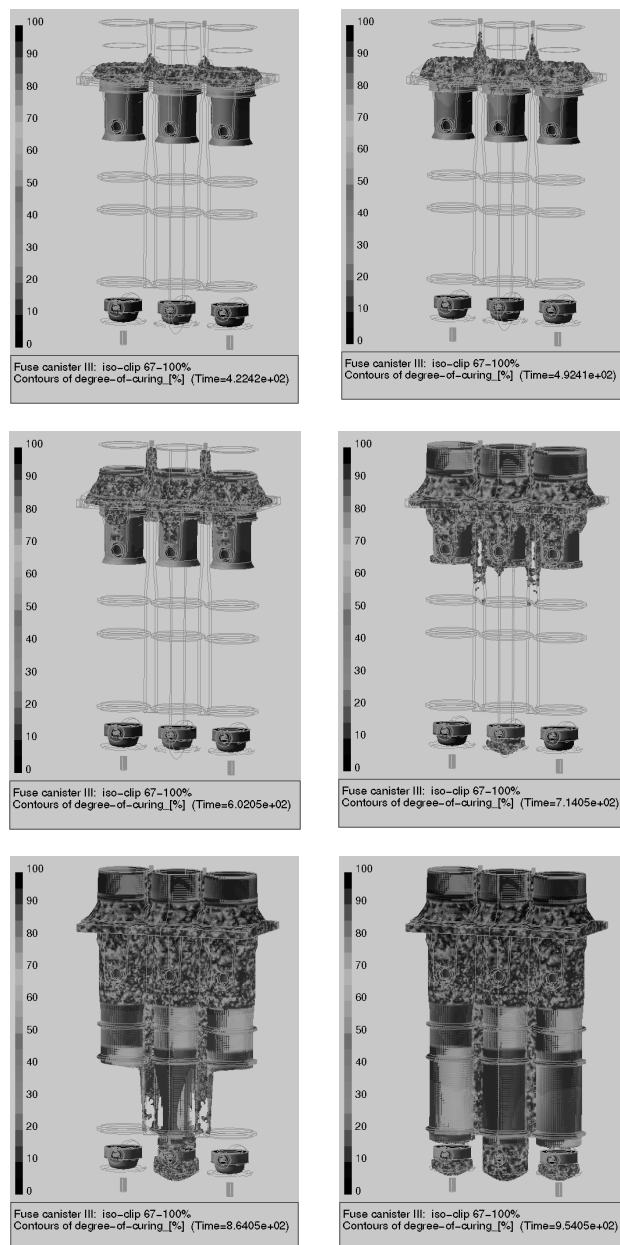
Rysunek 5 obrazuje wypełnianie wnętrza formy, natomiast na rysunku 6a przedstawiono rozkład temperatury w przekroju bezpiecznika na koniec procesu wypełniania formy, a na rysunku 6b rozkład stopnia utwardzenia dla tego samego czasu.



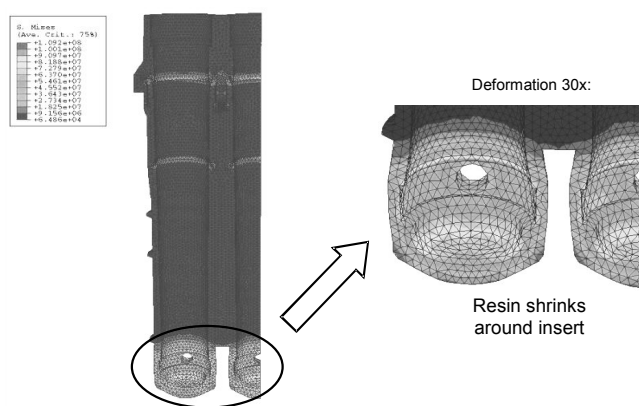
Rys.6. Rozkład temperatury (a) oraz stopnia utwardzenia (b) na przekroju przepustu (koniec fazy zalewania)

Z praktycznego punktu widzenia najważniejszą informacją uzyskaną z pierwszego etapu obliczeń jest opis zjawiska utwardzania wizualizowany poprzez przebieg frontu utwardzania. Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zjawiska utwardzania dla opisywanego przepustu średnio-napięciowego. Informacja ta pozwala na stwierdzenie, czy zjawisko utwardzania żywicy przebiega prawidłowo. W przypadku wystąpienia kilku frontów utwardzania możliwa jest modyfikacja układu grzania w celu uzyskania optymalnego przebiegu procesu.

Jak wspomniano wcześniej, po zakończeniu modelowania procesu zachodzącego w formie odlewniczej, dokonuje się transferu wyników temperatury i stopnia utwardzenia na model elementów skończonych, wykorzystywany w ABAQUS'ie, gdzie dokonuje się obliczeń strukturalnych. Jako wyniki otrzymuje się rozkład naprężeń i odkształceń w rozważanym produkcie oraz wielkość deformacji (rys. 8). Informacje te pozwalają na dobranie parametrów procesu oraz modyfikację kształtów, w taki sposób, aby uniknąć problemów z pęknięciami żywicy.



Rys.7. Propagacja frontu utwardzania



Rys.8. Naprężenia oraz deformacje w przepuście na koniec procesu formowania reaktywnego (po fazie chłodzenia do temperatury otoczenia)

## Podsumowanie

Opracowane narzędzie symulacyjne dla procesu formowania reaktywnego pozwala stwierdzić, że zastosowanie obliczeń z zakresu mechaniki płynów i wymiany ciepła w połączeniu z obliczeniami strukturalnymi może być wykorzystane w skali przemysłowej. Pozwala ono na uzyskanie informacji o przebiegu procesu utwardzania oraz o zachodzących zjawiskach mechanicznych w izolacji żywiczej. Dzięki zastosowaniu symulacji numerycznych można przyczynić się do skrócenia czasu wprowadzania na rynek nowych produktów.

## LITERATURA

- [1] Sekula R., Kaczmarek K., et al., *3-D Modeling Reactive Molding Processes: From Tool Development To Industrial Application*, Adv. in Polymer Technology, 22 (1) (2003), 1-14.

- [2] Macosko C.W., *Fundamentals of Reaction Injection Molding*, Hanser Verlag, 1989.  
[3] Kamal M.R. , Sourour S., *Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Resin*, Polymer Engineering and Science, 1973.

---

**Autorzy:** dr inż. Robert Sekuła, ABB Centrum Badawcze, ul. Starowiślna 13a, 31-038 Kraków,

E-mail: [robert.sekula@pl.abb.com](mailto:robert.sekula@pl.abb.com);

Mgr inż. Krzysztof Kasza, ABB Centrum Badawcze, ul. Starowiślna 13a, 31-038 Kraków,

E-mail: [krzysztof.kasza@pl.abb.com](mailto:krzysztof.kasza@pl.abb.com);

Mgr inż. Robert Płatek, ABB Centrum Badawcze, ul. Starowiślna 13a, 31-038 Kraków,

E-mail: [robert.platek@pl.abb.com](mailto:robert.platek@pl.abb.com);