

MECHANIKA

**CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS**

MECHANICS

WYDAWNICTWO

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1-M/2009

ZESZYT 3

ROK 106

ISSUE 3

YEAR 106

GRZEGORZ KMITA, TOMASZ NOWAK, ROBERT SEKUŁA,
YOSHIHISA KATAKURA*

MODELOWANIE I OCENA NAPRĘŻEŃ RESZTKOWYCH W KOMPONENTACH ŻYWICZNYCH

MODELLING AND ASSESMENT OF THE RESIDUAL STRESSES IN RESINS COMPONENTS

Streszczenie

Tworzywa termoutwardzalne są powszechnie stosowanymi materiałami izolacyjnymi w różnego rodzaju aparatach elektrycznych z zakresu średnich i wysokich napięć. W procesie ich przetwórstwa powstają w objętości materiału niejednorodne deformacje wynikające z występowania gradientów temperaturowych oraz nierównomiernej szybkości zachodzenia reakcji chemicznych. Dodatkowym czynnikiem nakładającym się na tak zdefiniowany stan układu jest interakcja materiału termoutwardzalnego z elementami współpracującymi, takimi jak metalowe części aktywne, których współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej w szerokim zakresie temperatur mogą znacznie różnić się od współczynników rozszerzalności żywicy stanowiącej izolację aparatu. W rezultacie, w komponentach żywicznych występują po przetwórstwie naprężenia o wartościach często zbliżonych do wartości wytrzymałości granicznej, które nie relaksują w całości na drodze dodatkowej obróbki cieplej. W pracy przedstawiono sposób modelowania naprężeń resztkowych powstających w komponentach żywicznych podczas procesu przetwórstwa tworzyw termoutwardzalnych. Badania zostały rozszerzone o eksperymentalną weryfikację wyników obliczeń przeprowadzoną w warunkach obciążeń cieplnych.

Słowa kluczowe: tworzywa termoutwardzalne, naprężenia resztkowe, właściwości lepko-sprężyste

Abstract

Thermosetting resins are commonly used as insulating materials in different types of medium and high voltage electrical devices. During manufacturing process, due to fluctuations of temperature and non-uniform curing rate, internal deformations occur leading to stress built-up in

* Dr inż. Grzegorz Kmita, dr inż. Tomasz Nowak, dr inż. Robert Sekuła, dr inż. Yoshihisa Katakura, ABB Centrum Badawcze, Kraków.

the product. This internal stress development may be additionally enhanced by interaction between resin and different type of active metallic inserts having significantly different values of thermal linear coefficients. As a result, value of stress close to mechanical strength of thermosetting material can be even expected in the structure after the manufacturing process. This type of residual stresses is difficult to remove by usual relaxation step and may have damaging effect on the durability of the products. In the paper experimental and numerical results of internal stresses development during manufacturing process of epoxy based component are presented. The verification of behavior of the epoxy resin material was done by strain gauge measurements on the thermally loaded real product component.

Keywords: thermosetting resins, residual stresses, viscoelastic properties

1. Wstęp

W procesie przetwórstwa tworzyw termoutwardzalnych dochodzi do powstawania i rozwoju w objętości materiału niejednorodnych deformacji wynikających z występowania gradientów temperaturowych oraz nierównomiernej szybkości zachodzenia reakcji chemicznych. Następtwem tych deformacji jest pojawienie się układu naprężeń wewnętrznych, na który nierzadko nakłada się interakcja materiału termoutwardzalnego ze wszelkiego typu elementami współpracującymi, wytworzonymi z materiałów o bardzo różnych współczynnikach liniowej rozszerzalności cieplnej. W rezultacie, na skutek interakcji na granicy materiałów, w komponentach żywicznych po przetwórstwie pojawiają się naprężenia o wartościach często zbliżonych do wartości wytrzymałości granicznej materiału.

W celu redukcji naprężeń resztkowych najczęściej stosowaną operacją jest proces relaksacji naprężeń realizowany w piecach tunelowych o strefowym gradiencie temperaturowym. Spełnia on jednak tylko częściowo swoje zadania redukując naprężenia wynikające z nierównomiernego sieciowania w objętości żywicy, a nie naprężenia termiczne związane z różnicą współczynników rozszerzalności termicznej. W rezultacie w strukturze materiału żywicznego zapoczątkowany zostaje proces przedwczesnego rozwoju pęknięć ograniczający wytrzymałość zmęczeniową produktu oraz zmniejszający jego ogólną odporność na kolejne sekwencje obciążeń eksploatacyjnych.

W pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowych procesu utwardzania i relaksacji systemu opartego na żywicy epoksydowej typu CY228 (Huntsman) oraz poddano ocenie wielkość naprężeń resztkowych powstających w czasie tych procesów. Analizę przeprowadzono przy użyciu komercyjnego oprogramowania FLUENT i ANSYS. Wyniki obliczeń numerycznych poddano weryfikacji w warunkach laboratoryjnych.

2. Charakterystyka materiału lepko-sprężystego

2.1. Właściwości lepko-sprężyste

Do analizy i oceny wielkości naprężeń resztkowych pochodzenia termicznego w komponentach żywicznych wykorzystany został model lepko-sprężysty materiału [1, 2], wymagający opisu jego zachowania w funkcji czasu i temperatury. W praktyce pomiarowej badania właściwości lepko-sprężystych żywicy epoksydowej realizuje się w dziedzinie częstotliwości i opisuje się za pomocą zmian modułów zachowawczego $G'(\omega)$ oraz stratno-

ści $G''(\omega)$ w funkcji częstotliwości i temperatury. Na ich podstawie wyznacza się moduł relaksacji $G(t)$ w dziedzinie czasu, wyrażony jako [3]:

$$G'(\omega) = G_r + [G_g - G_r] \sum_{i=1}^n g_i \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (1)$$

$$G''(\omega) = [G_g - G_r] \sum_{i=1}^n g_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (2)$$

$$G(t) = G_r + [G_g - G_r] \sum_{i=1}^n g_i e^{-t/\tau_i}, \quad (3)$$

gdzie:

- G_g - opisuje natychmiastową odpowiedź materiału,
- G_r - opisuje odpowiedź materiału po zejściu relaksacji,
- t - czas [s],
- ω - częstość kołowa [rad/s],
- τ_i - czas relaksacji dla i -tego składnika sumy,
- g_i - czynnik wagowy dla i -tego czasu relaksacji.

2.2. Wpływ temperatury

W celu uwzględnienia wpływu temperatury na każdy składnik wagowy czasu relaksacji stosuje się temperaturowe współczynniki przesunięcia a_T zgodnie z równaniem:

$$\tau_i(T) = a_T \tau_i(T_{ref}) \quad (4)$$

gdzie:

- T – temperatura analizy,
- T_{ref} – temperatura referencyjna.

Zakłada się, że dla materiału termo-reologicznie prostego, wszystkie moduły materiałowe opisane są przez jednakowy zestaw składników wagowych czasu relaksacji. Znanych jest co najmniej kilka sposobów opisywania temperaturowych współczynników przesunięcia, z których najbardziej rozpowszechnionym jest model William'a-Landell'a-Ferry'ego (WLF) [4] opisany równaniem:

$$\log a_T(T) = \frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (5)$$

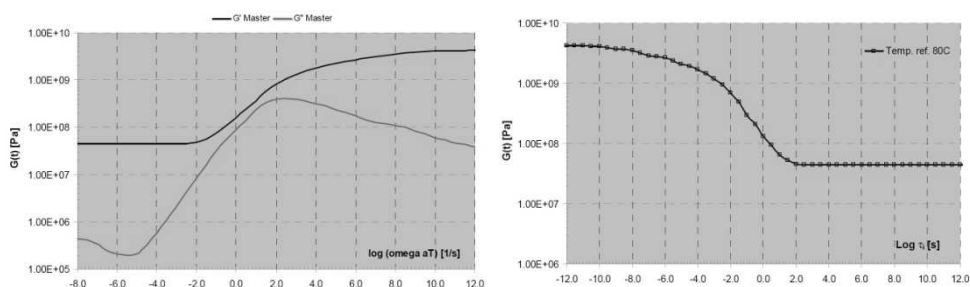
gdzie: C_1, C_2 – stałe kalibracyjne.

3. Wyniki pomiarów

3.1. Właściwości lepko-sprężyste

W celu wyznaczenia właściwości lepko-sprężystych żywicy oraz temperaturowych współczynników przesunięcia zastosowano analizę termiczną DMA. Testy zostały przeprowadzone metodą ścinania oscylacyjnego dla kilkunastu częstotliwości z zakresu 0.1 ÷ 50 Hz. Konwersja otrzymanych danych z wykorzystaniem współczynników przesunię-

cia temperaturowego a_T [5], pozwoliła na skonstruowanie krzywych wiodących uzależniających dynamiczne moduły ścinania oraz moduł relaksacji od czasu (rys. 1).



Rys. 1. Krzywe wiodące modułów dynamicznych G' i G'' oraz modułu relaksacji $G(t)$, $T_{ref} = 80^\circ\text{C}$

Fig. 1. Master curves of dynamic moduli G' , G'' and relaxation modulus $G(t)$, $T_{ref} = 80^\circ\text{C}$

Tabela 1

Czasy relaksacji τ_i oraz współczynniki g_i

	τ_i	g_i
1	3.16E-14	0.07169
2	3.16E-13	0.04585
3	3.16E-11	0.00697
4	3.16E-10	0.08540
5	3.16E-08	0.19158
6	3.16E-06	0.14466
7	3.16E-05	0.06654
8	3.16E-04	0.11455
9	3.16E-03	0.09886
10	3.16E-02	0.10532
11	3.16E-01	0.03790
12	3.16E+00	0.01628
13	3.16E+01	0.00505

Do opisu modułu relaksacji w czasie zgodnie z równaniem (3), zastosowano ciąg Prony'ego, którego współczynniki oraz czasy relaksacji pokazuje

Tabela 1. Wyznaczone wartości współczynników kalibracyjnych modelu WLF uzależniających właściwości opisanego powyżej modelu od temperatury zawiera tabela 2.

Tabela 2

Wartości stałych kalibracyjnych modelu WLF

T_{ref} [°C]	C_1	C_2
80	14.1	69.6

4. Obliczenia numeryczne

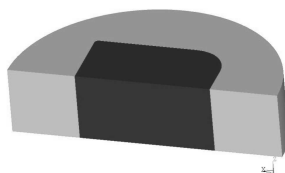
4.1. Procedura obliczeniowa

W obliczeniach wykorzystano model geometryczny sześciennego rdzenia stalowego (40x40x40 mm) o krawędziach zakończonych promieniami 1mm i 10mm, otoczonego walcem żywicznym o średnicy 80 mm. Ze względu na pełną symetrię układu, analizie poddano jedynie jego wycinek (ryc.Rys. 2).

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dwuetapowo:

1. Symulacja procesu utwardzania z uwzględnieniem rozkładu temperatur w elemencie żywicznym w momencie, w którym żywica osiąga 65% stopnia utwardzenia (FLUENT).
2. Symulacja procesu dotwardzania na podstawie początkowego rozkładu temperatur uzyskanego w etapie utwardzania (ANSYS).

Symulacje etapu utwardzania miały na celu uchwycenie rozkładu temperatur w początkowym etapie utwardzania żywicy, w którym następuje ustalenie wymiarów geometrycznych komponentów. Temperatura ta jest w późniejszych rozważaniach traktowana jako temperatura odniesienia, przy której badany układ jest wolny od naprężeń strukturalnych pochodzenia termicznego.



Rys. 2. Uproszczony model geometryczny analizowanego układu

Fig. 2. Simplified model of the analyzed system

4.2. Modelowanie etapu utwardzania żywicy

W obliczeniach numerycznych kinetyki procesu utwardzania żywicy zastosowano model Kamal'a opisany równaniem (5), którego parametry kinetyki procesu pokazuje Tabela 3 [6]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left(A_1 e^{-E_1/T} + A_2 e^{-E_2/T} \alpha^m \right) (1 - \alpha)^n, \quad (5)$$

gdzie:

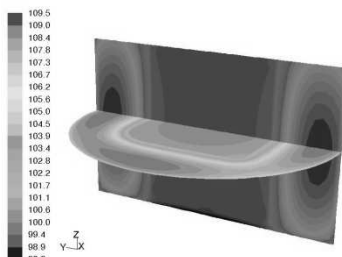
- α - stopień utwardzenia,
 m, n, A_1, A_2, E_1, E_2 - stałe opisujące kinetykę reakcji,
 T - temperatura.

Tabela 3

Parametry kinetyki utwardzania

H_{tot} [J/kg]	A_1 [1/s]	A_2 [1/s]	E_1 [K]	E_2 [K]	m	N
103340	2.293E+9	1.163E+5	11654	7182	0.438	1.118

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uwzględniających ciepło dostarczone do układu oraz egzotermiczny charakter samego procesu utwardzania, jako temperaturę odniesienia uznano temperaturę zarejestrowaną na przejściu metal-żywica (rys. 3).



Rys. 3. Rozkład temperatur na przekroju modelu dla 65% stopnia utwardzenia [°C]

Fig. 3. Temperature distribution at cross-section of the model for 65% degree of cure [°C]

4.3. Modelowanie procesu relaksacji naprężeń

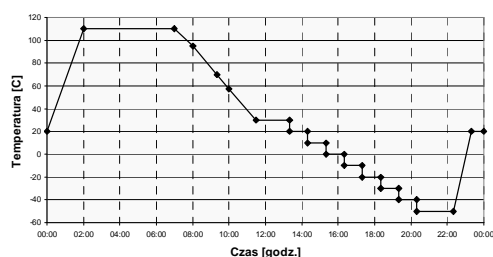
Analiza strukturalna procesu relaksacji naprężeń w komponentach żywicznych została przeprowadzona z uwzględnieniem właściwości lepko-sprężyste żywicy oraz wartości temperatury odniesienia, w której osiągnięto 65% stopnia utwardzenia materiału (opis: tabela 1, tabela 2). Pozostałe właściwości materiałowe żywicy wykorzystane w symulacji pokazuje tabela 4. Opisywany układ poddano obciążeniom termicznym zgodnie z zależnością pokazaną na wykresie poniżej (rys. 4).

Krzywą temperaturową zaczerpnięto z przykładowego profilu przemysłowego pieca tunelowego i rozszerzono o niskotemperaturowy zakres testu odpowiadający badaniu odporności na pękanie w obniżonych temperaturach.

Tabela 4

Podstawowe właściwości materiałowe żywicy

E [GPa]	T _g [°C]	CTE (<T _g) [1/K]	CTE (>T _g) [1/K]
12.9	75-80	41·10 ⁻⁶	100·10 ⁻⁶

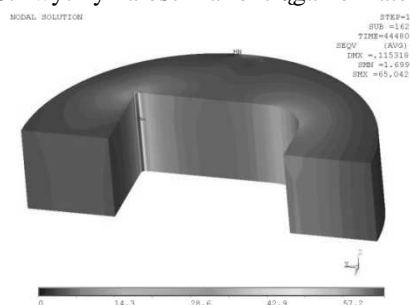


Rys. 4. Profil temperaturowy stosowany w obliczeniach oraz testach z obciążeniami cieplnymi

Fig. 4. Temperature profile used in simulation and thermally loaded tests

4.4. Analiza wyników symulacji numerycznych

Przeprowadzone na przykładzie prostego modelu geometrycznego obliczenia wskazują na możliwość powstawania w parach materiałowych żywica – metal bardzo wysokich naprężeń reszkowych pochodzenia termicznego. Na krzywiznie o promieniu 1 mm, po schłodzeniu układu do temperatury pokojowej, naprężenia osiągały wartość około 65 MPa, co stanowi blisko 80% wartości wytrzymałości na rozciąganie materiału (!), rys. 5.



Rys. 5. Rozkład naprężeń w żywicy w końcowym stadium etapu dotwardzania (temp. 20°C)

Fig. 5. Stress distribution in the resin at the end of post-curing process (temp. 20°C)

Zakumulowany stan tak wysokich naprężeń reszkowych prowadzi w konsekwencji do drastycznego spadku wytrzymałości zmęczeniowej materiału i nawet jednorazowe poddanie komponentu działaniu obniżonej temperatury może prowadzić do jego zniszczenia.

5. Weryfikacja wyników obliczeń

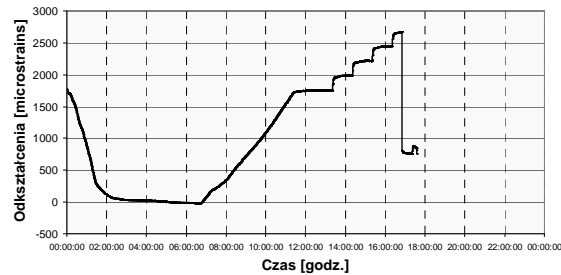
Wyniki obliczeń poddano weryfikacji przeprowadzając w komorze klimatycznej eksperyment odwzorowujący warunki dotwardzania i relaksacji. Eksperyment przeprowadzono rejestrując lokalne odkształcenia badanych obiektów przy pomocy metody tensometrii oporowej. Uzyskane wyniki wskazują jednoznacznie na możliwość występowania w badanych komponentach żywicznych wysokich naprężeń reszkowych o charakterze rozciągającym (ok. 65MPa). W czasie testu próbki ulegały zniszczeniu na skutek pęknięcia żywicy na profilu geometrycznym o promieniu 1 mm, nierzadko po osiągnięciu temperatury niewiele niższej od 0°C (rys. 6 i rys. 7).

Rezultaty eksperymentu pozwalają sądzić, że proponowana metodologia dokonywania oceny wartości naprężeń reszkowych pochodzenia termicznego przy zastosowaniu obliczeń numerycznych pozwala odzwierciedlać zachowanie komponentów żywicznych w trakcie procesów odlewania, utwardzania oraz relaksacji. Stwarza to możliwości przewidywania obszarów krytycznych w trakcie projektowania aparatów, w których budowie zastosowano materiały o dużych różnicach w wartościach współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej.



Rys. 6. Komora klimatyczna oraz próbki z widocznymi pęknięciami

Fig. 6. Climatic chamber and samples with visible cracks



Rys. 7. Przykładowy wykres odkształceń zarejestrowanych przy pomocy tensometru (z uchwycioną chwilą pęknięcia materiału)

Fig. 7. Example of strain variation registered using the strain gauge (material cracking visible)

6. Podsumowanie

Naprężenia resztkowe związane z występującymi w aparaturze elektrycznej różnicami w wartościach współczynników liniowej rozszerzalności termicznej pomiędzy komponentami metalowymi i żywicznymi są zjawiskiem, które pozostawione bez kontroli, prowadzi często do zniszczenia lub utraty funkcjonalności urządzenia.

Przeprowadzone na prostym modelu badania wskazują na możliwość modelowania oraz skuteczność w przewidywaniu ich wielkości przy zastosowaniu obliczeń numerycznych oraz zaproponowanej metodologii. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że największe naprężenia powstają w momencie obniżenia temperatury poniżej pewnej wartości krytycznej, dla której efektywność relaksacji spada, a różnica w wymiarach geometrycznych pomiędzy rdzeniem stalowym i korpusem żywicznym osiąga znaczące wartości.

Literatura

- [1] Yang D.G., Jansen K.M.B., Ernst L.J., Zhang G.Q., van Driel W.D., Bressers H.J.L., Janssen J.H.J., *Numerical modeling of warpage induced in QFN array molding process*, Microelectronics Reliability 47 (2007) 310–318
- [2] Zhao L.G., Warrior N.A., Long A.C., *A thermo-viscoelastic analysis of process-induced residual stress in fibre-reinforced polymer–matrix composites*, Materials Science and Engineering A 452–453 (2007), 483–498
- [3] Ferry J.D., *Viscoelastic Properties of Polymers*, John Wiley and Sons: New York, 1980
- [4] Williams M.L., Landell R.F., Ferry J.D., *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids*, Journal of American Chemical Society 1955, 77, 3701-3707
- [5] O'Brien D.J., Mather P.T., White S.R., *Viscoelastic Properties of an Epoxy Resin during Cure*, Journal of Composite Materials, Vol. 35, No. 10, 883-904 (2001)
- [6] Sekuła R., Saj P., Nowak T., Kaczmarek K., Forsman K., Rautiainen A., Grindling J., *3-D Modeling Reactive Molding Processes: From Tool Development To Industrial Application*, Advances in Polymer Technology, Vol. 22, No. 1, 1–14 (2003).