

NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL SHOCK OF FGMS DISKS

Tadeusz Niezgoda*, Marek Boniecki**, Krzysztof Kosiuczenko*, Wiesław Barnat*

Wojskowa Akademia Techniczna

*Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej WAT

**Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych

Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland

tel.: +48 22 6839461, fax: +48 22 6839461

e-mail: kmiis@wme.wat.edu.pl

Abstract

The paper presents a description of the numerical simulation of the thermal shock in cylindrical composite specimens of diversified thickness. The specimens were made of graded materials (Al_2O_3 with various admixture of ZrO_2). The material parameters used in numerical calculations were calculated on the grounds of the mixture method. The simulation was carried out using the Finite Element Method implemented in the LS-Dyna code. The results of numerical calculations were verified experimentally.

The aim of the paper is theoretical modelling of the thermal shock problem in a strip made of functionally graded composite (FGMs). The distributions of thermal are analyzed respectively by thermo-mechanical finite element analysis (FEA). The propagation of stress in FGMs is studied numerically by means of the LS Dyna code. The numerical simulation demonstrates the applicability of the algorithm to the modeling of FGM without any averaging procedure. The thermal shock resistance of disks ($780^\circ C$) was evaluated by sudden cooling with a high-velocity nitrogen jet at room temperature ($20^\circ C$).

Keywords: FEM, FGM, stress, thermal shock

SYMULACJA NUMERYCZNA SZOKU TERMICZNEGO DYSKÓW GRADIENTOWYCH

Streszczenie

Praca zawiera opis symulacji numerycznej szoku termicznego w cylindrycznych próbkach kompozytowych o zróżnicowanej grubości. Próbki wykonano z materiałów gradientowych na bazie aluminy Al_2O_3 , z warstwami o zróżnicowanej zawartości cyrkonii ZrO_2 w każdej warstwie. W celu przeprowadzenia oceny otrzymanych wyników numerycznych wykonano eksperyment. Wykorzystywane w obliczeniach parametry materiałowe obliczono w oparciu o wzory zaczerpnięte z teorii mieszanin.

Symulację przeprowadzono wykorzystując metodę elementów skończonych zaimplementowaną w programie LS-Dyna. Modele numeryczne symulacji składały się z siatki elementów bryłowych 6 i 8-węzłowych z 3 stopniami swobody w każdym węźle, opisującej 5-stopniowy wycinek krążka. Odpowiedni sposób zdefiniowania warunków brzegowych umożliwił zmniejszenie wielkości zadania numerycznego poprzez wykorzystanie osiowej symetrii. Otrzymane wyniki symulacji numerycznej pozwalają ocenić poziom naprężeń w materiale gradientowym poddanym szokowi termicznemu. Pozwalają na świadome kształtowanie odporności termicznej barier cieplnych, nie tylko modyfikując ich grubość, ale również skład chemiczny warstw.

Zestawienie wyników symulacji numerycznej i eksperymentu pokazuje niewielkie różnice w przebiegach wykresów temperatur, co świadczy o poprawności zamodelowania zjawiska.

Słowa kluczowe: MES, materiały gradientowe, szok termiczny, naprężenia

1. Wstęp

Kompozyty gradientowe (FGMs- Functionally Graded Materials) są to materiały, w których wzdłuż co najmniej jednego określonego kierunku, uzyskano w sposób celowy zmianę

właściwości użytkowych lub konstrukcyjnych w wybranym procesie technologicznym. Stopniowe, kontrolowane przejście pomiędzy właściwościami materiałów składowych, umożliwia w miarę pełną adaptację wyrobu do przewidywanych warunków jego eksploatacji. Materiały te znane są od wielu stuleci, choć ich obecna nazwa pojawiła się niedawno. Cechują się bardzo przydatnymi własnościami fizycznymi, np. odpornością na korozję termiczną w połączeniu z dużą wytrzymałością mechaniczną (mniejsze naprężenia termiczne, resztkowe i koncentracje naprężeń w porównaniu z kompozytami). W ostatnim dziesięcioleciu prowadzono intensywne badania różnych zastosowań FGM, zmierzające zwłaszcza do opracowania barier termicznych na potrzeby przemysłu kosmicznego oraz instalacji nuklearnych. Tak więc np., w latach 1984-85 poszukiwano tworzywa mogącego stanowić poszycie konstrukcji kosmicznych i lotniczych. Najważniejszym warunkiem, który ten materiał musiał spełniać, była redukcja naprężeń cieplnych wynikających z pracy elementu w gradiencie temperatury rzędu 1300° C.

Badania obciążeń termicznych FGM prowadzono w różnych ośrodkach naukowych. Oparte są one na dwóch metodach: na eksperymencie laboratoryjnym oraz na symulacjach numerycznych. Efektywność ostatniej metody zależy m.in. od przyjętego rozkładu wartości współczynnika przewodzenia ciepła na powierzchni próbek. Obszerną analizę różnych rozkładów przedstawiono w pracach Tomby [1, 2, 3, 7, 8] i Sadowskiego [5, 6, 11].

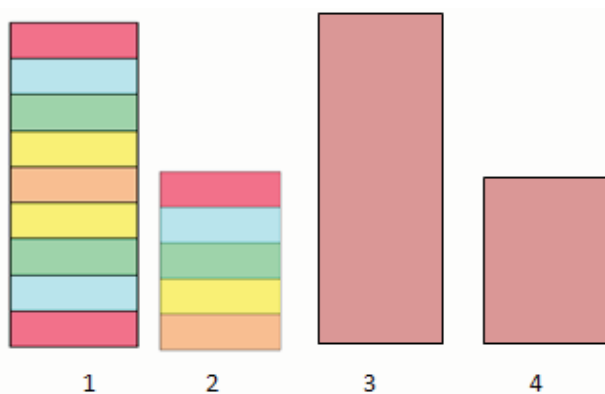
W przedstawionej pracy przyjęto rozkłady współczynników przewodzenia zgodnie z wnioskami sformułowanymi przez ww. autorów.

2. Badania eksperymentalne

Przedmiotem badań jest ceramika gradientowa na bazie aluminy Al_2O_3 , z warstwami o zróżnicowanej zawartości cyrkonii ZrO_2 w każdej warstwie:

- w próbkach o $g=2.8mm$ kolejno: 3.3%-6.8%-10.3%-14.0% wagowo ZrO_2 ,
 - w próbkach o $g=4.8mm$ kolejno: 3.3%-6.8%-10.3%-14.0%-10.3%-6.8%-3.3% wagowo ZrO_2 .
- Próbki o grubości $g=2.5mm$ oraz $g=5mm$ zawierały jednorodną alumineę.

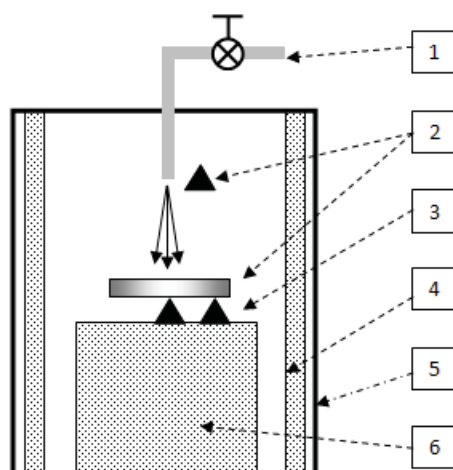
Analizowane próbki są zbudowane w kształcie dysków o średnicy $D=30mm$ i grubości g . Górne warstwy próbek były wstępnie polerowane. Przekroje próbek przedstawiono na poniższym rysunku:



Rys. 1. Przekroje próbek: 1- alumina z cyrkonią $g=4.8mm$ 2- alumina z cyrkonią $g=2.8mm$, 3- alumina $g=5mm$, 4-alumina $g=2.5mm$

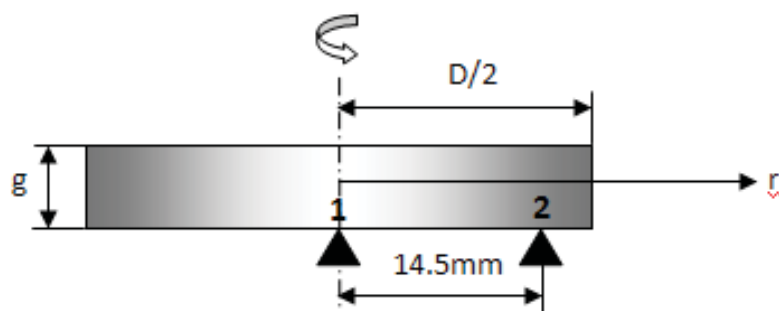
Fig. 1. Cross-section of the specimens: 1- alumina with zirconia $g=4.8mm$ 2- alumina with zirconia $g=2.8mm$, 3- alumina $g=5mm$, 4-alumina $g=2.5mm$

Po podgrzaniu w piecu do temperatury 780°C w ciągu 2h, próbki poddane były szokowi termicznemu. Wytwarzany był w osi dysku przy użyciu silnego strumienia gazu (azot) o temperaturze pokojowej 20°C doprowadzonego przez metalową rurkę o średnicy wewnętrznej $2r_0=4.5mm$, z wylotem zawieszonym 3mm na górną powierzchnię próbki (wydatek 17dm³/min) (Rys.2).



Rys. 2. Instalacja badawcza: 1- przewód z azotem, 2- próbka, 3-termopara, 4-grzejnik, 5-piec, 6- materiał ogniotrwały
 Fig. 2. Schema of the thermal shock test apparatus: 1- conduit supplying nitrogen, 2-specimen, 3-thermocouple, 4-heater, 5-furnace, 6- refractory material

Zmiany temperatury w czasie szoku mierzone były za pomocą dwóch termopar Pt/PtRh umieszczonych w środku i 14.5mm od środka na dolnej powierzchni próbki. Czas doprowadzania gazu ustalany jest precyzyjnie przez trzecią termoparę umieszczoną u wylotu rurki (Rys.2).



Rys. 3. Umieszczenie termopar stykających się z próbka: 1 – pomiar T_1 , 2 – pomiar T_2
 Fig. 3. Lay-out of the thermocouples on the upper surface of specimens

Ostatecznie, przy wykorzystaniu przetwornika AC-CA i komputera PC uzyskano wyniki w postaci funkcji $T(t)$ dla $t=0-20$ sek.

3. Oszacowanie współczynnika przewodzenia ciepła

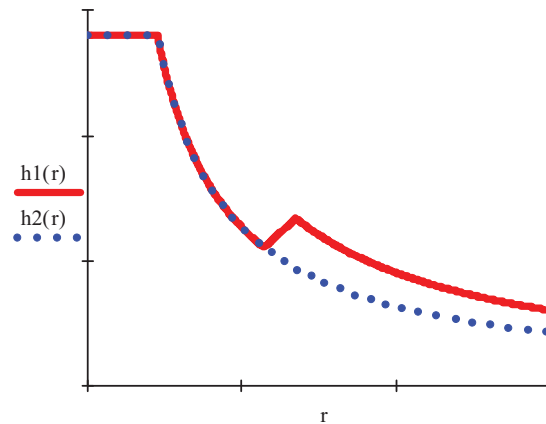
W literaturze spotyka się różne sposoby szacowania współczynnika przewodzenia ciepła h związanego z konwekcją cieplną dla rozważanego przypadku. Obszerną analizę zawierają prace [1,2]. Najczęściej rozkład wzdłuż promienia dysku $h(r)$ opisywany jest dwoma alternatywnymi modelami. Model najprostszy zakłada, że współczynnik h ma wartość stałą ($h_0=280\text{W/m}^2\text{K}$) dla promienia mniejszego od promienia rurki doprowadzającej azot, natomiast dalej jest opisany prostą funkcją hiperboliczną:

$$h(r) = \begin{cases} h_0, & 0 \leq r \leq r_0 \\ h_0 r_0 \frac{1}{r}, & r_0 < r \leq \frac{D}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Drugi model uwzględnia gwałtowny wzrost wartości h (do $h_0'400\text{W/m}^2\text{K}$) za obszarem stagnacji (r_c), po którym następuje hiperboliczny spadek. Wzrost współczynnika przewodzenia spowodowany jest wzrostem turbulencji przepływającego gazu. Wartość liczby Reynoldsa znacznie przekracza wartość krytyczną ($Re=70000 \gg Re_{kr}$) [2].

$$h(r) = \begin{cases} h_0, & 0 \ll r \ll r_0 \\ h_0 r_0 \frac{1}{r}, & r_0 < r \ll \frac{D}{2}, \\ h_0' r_0 \frac{1}{r}, & r_0 < r \ll \frac{D}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Funkcje opisane równaniami 1 i 2 przedstawiono na poniższym rysunku:



Rys. 4. Rozkład wartości współczynnika przewodzenia ciepła: $h_1(r)$ - wg. funkcji (1), oraz $h_2(r)$ -wg. funkcji (2)
 Fig. 4. Distribution of the heat transfer coefficient along the radius of the specimen: $h_1(r)$ - according to the function (1), and $h_2(r)$ - according to the function (2)

Przydatność obu przedstawionych modeli rozkładu $h(r)$ analizowana były przez Tombę i Cavalieriego podczas weryfikacji eksperymentalnej modeli numerycznych [2]. Model opisany funkcją (2) okazał się zdecydowanie poprawniejszy. Dlatego więc autorzy zdecydowali się na uwzględnienie tego właśnie modelu w opisywanej symulacji numerycznej.

4. Dobór parametrów materiałowych

Analizowane materiały: Al_2O_3 oraz FGM Al_2O_3/ZrO_2 wykonane zostały z proszku aluminy pochodzącej ze Skawiny oraz proszku ZrO_2 z firmy Zhongshun Sc&Tech. Podstawowe dane materiałowe aluminy i cyrkonii zaczerpnięto z literatury [4,11]. Dane te uwzględniają wpływ temperatury:

$$\rho=\rho(T), E=E(T), \nu=\nu(T), \alpha=\alpha(T), R_e=R_e(T), E_T(T), c_p=c_p(T), k=k(T), \quad (3)$$

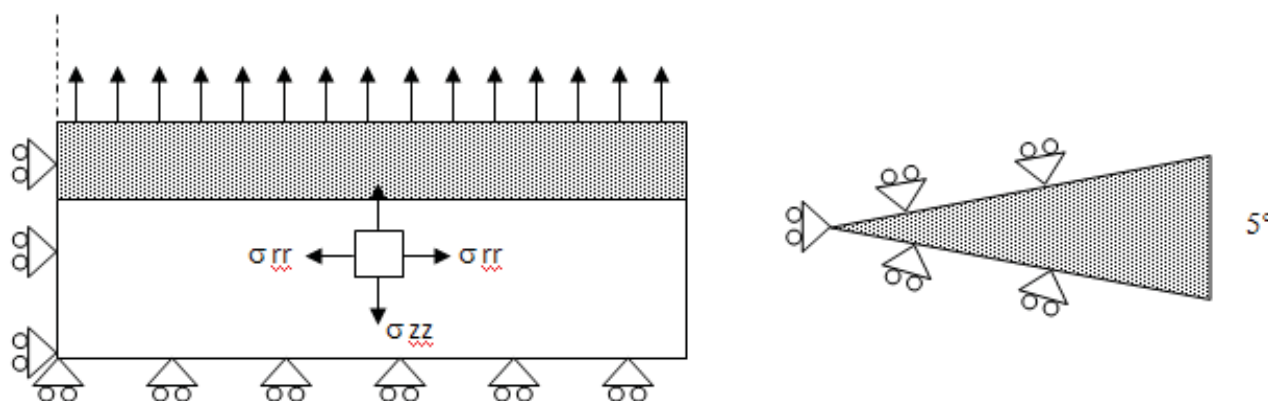
Osobnym problemem było uzyskanie danych materiałowych dla wszystkich warstw FGM. Dlatego autorzy wykorzystali wzory pochodzące z teorii mieszanin [10]:

$$\begin{aligned} E &= \nu_1 \cdot E_1 + \nu_2 \cdot E_2 \\ \nu &= \nu_1 \cdot \nu_1 + \nu_2 \cdot \nu_2 \\ \alpha &= \frac{\nu_1 \cdot \alpha_1 \cdot E_1 + \nu_2 \cdot \alpha_2 \cdot E_2}{\nu_1 \cdot E_1 + \nu_2 \cdot E_2}, \\ R_e &= \nu_1 \cdot R_{e1} + \nu_2 \cdot R_{e2} \\ \rho &= \nu_1 \cdot \rho_1 + \nu_2 \cdot \rho_2 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: ν_1 i $\nu_2=1-\nu_1$ wyrażają udziały wagowe Al_2O_3 oraz ZrO_2 w mieszaninie.

5. Badania numeryczne

Model numeryczny symulacji składał się z siatki elementów bryłowych 6 i 8-węzłowych z 3 stopniami swobody w każdym węźle, opisującej 5-stopniowy wycinek krążka. Odpowiedni sposób zdefiniowania warunków brzegowych umożliwił zmniejszenie wielkości zadania numerycznego poprzez wykorzystanie osiowej symetrii (Rys.5).



Rys. 5. Schemat ilustrujący warunki brzegowe (w płaszczyźnie ZX i ZY)

Fig. 5. Schema of boundary conditions (in planes ZX and ZY)

Model składał się odpowiednio z 5 lub 9 warstw elementów. Wysokość każdego elementu równa była ilorazowi grubości próbki i liczby warstw.

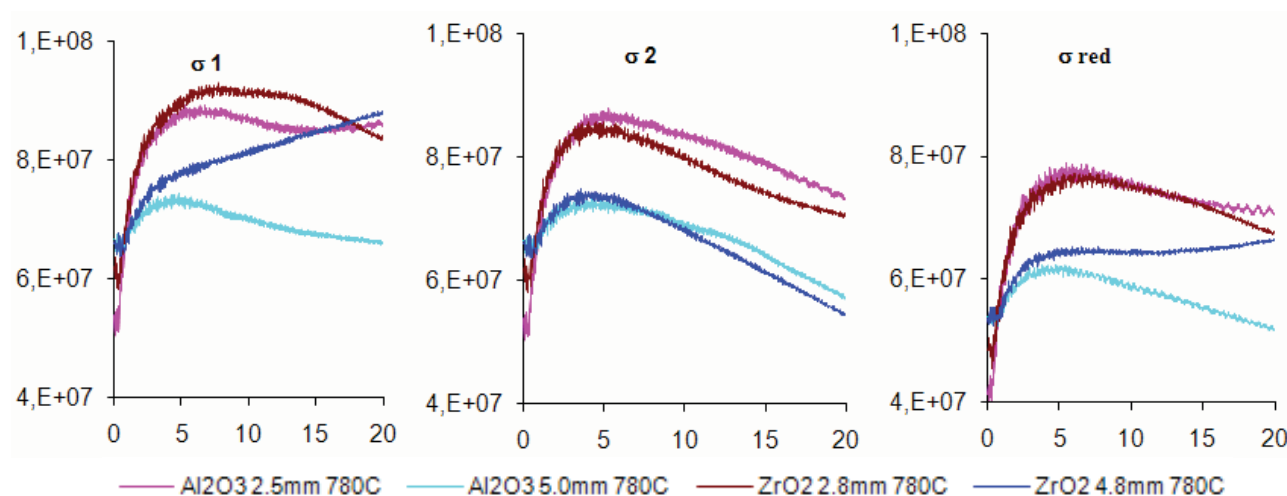
Elementom należącym do każdej warstwy przyporządkowano inne dane materiałowe. Dane materiałowe odpowiadały składowi chemicznemu każdej warstwy (Rys.1).

Obliczenia numeryczne wykonano w programie LS Dyna wersji 971 firmy Livermore Software Technology Corp [12, 13]. W opracowanym kodzie obliczeniowym wykorzystano metodą explicite. Metoda ta polega na wykonywaniu operacji i otrzymywaniu rozwiązania wprost, na podstawie rozwiązania z kroku poprzedniego. Jest prosta w użyciu, ale ograniczona przez wielkość kroku całkowania. Dlatego czas obliczeń numerycznych był stosunkowo długi.

Kod numeryczny zrealizowano na 48-procesorowym klastrze obliczeniowym pn. „Chrobry” zbudowanym w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej WAT [14].

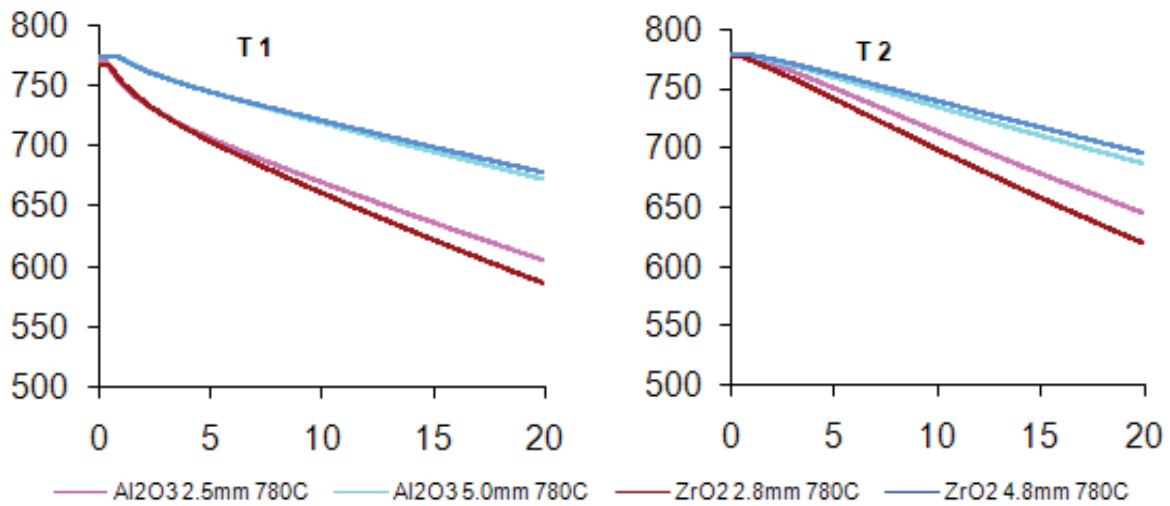
6. Wyniki obliczeń

W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano wyniki, z których dokładnej analizie poddano przebiegi wartości temperatur zmierzone w miejscach odpowiadających rozmieszczeniu termopar oraz naprężeń ekstrapolowanych do węzła leżącego na osi próbki w płaszczyźnie górnej (Rys.3.). Wyniki te przedstawiono na kolejnych rysunkach:



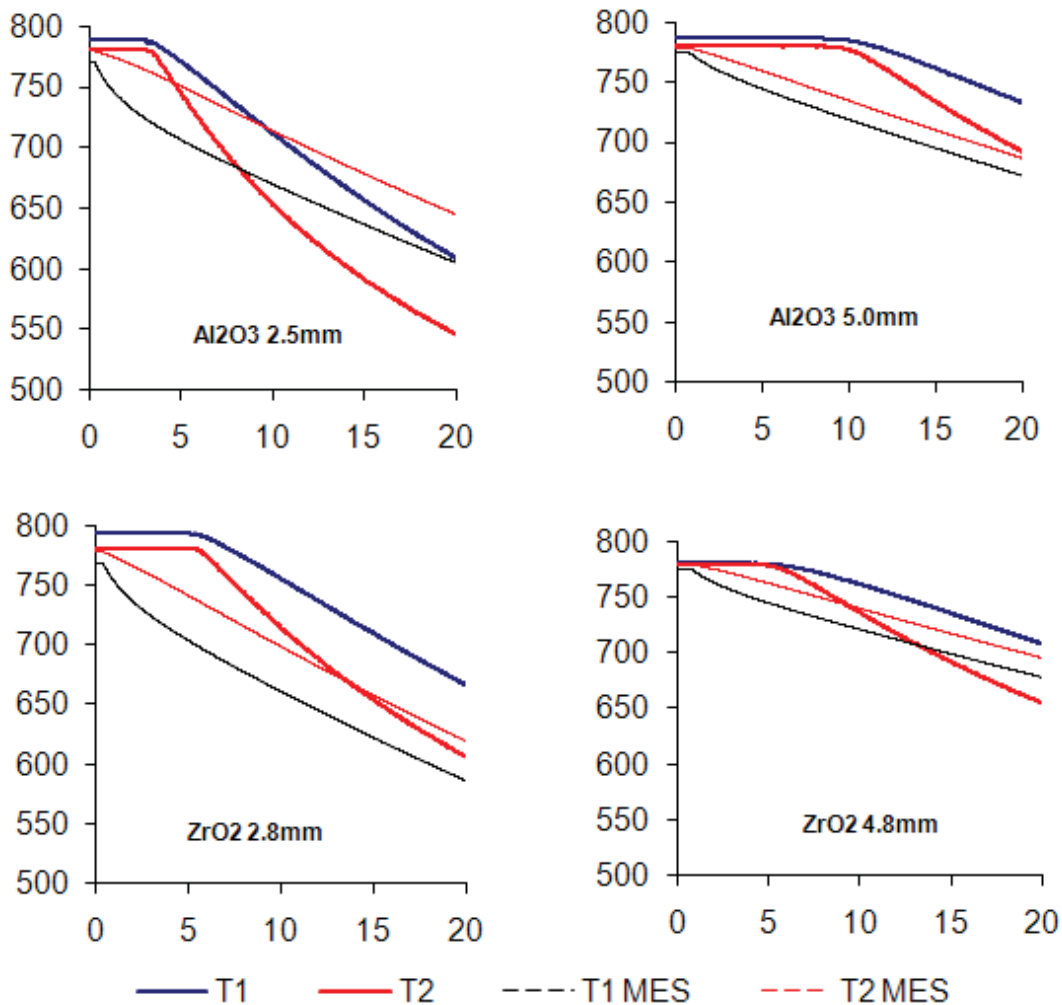
Rys. 6. Wykresy naprężeń głównych (Pa) σ_1 i σ_2 oraz zredukowanych σ_{red} w funkcji czasu (s)

Fig. 6. Radial variation of stresses at the center of the upper surface (obtained by FEM)



Rys. 7. Uzyskane wykresy temperatur T_1 i T_2 ($^{\circ}\text{C}$) w funkcji czasu (s)
 Fig. 7. Numerical temperature profiles at points 1 and 2

W celu przeprowadzenia oceny otrzymanych wyników numerycznych wykonano eksperyment, którego wyniki ukazuje kolejna ilustracja. Wykonano go w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie. Podczas eksperymentu mierzone były temperatury T_1 i T_2 próbek:



Rys. 8. Wykresy temperatur T_1 i T_2 ($^{\circ}\text{C}$) w funkcji czasu (s) otrzymane z MES oraz pochodzące z eksperymentu
 Fig. 8. Experimental and FEM calculated temperature profiles at points 1 and 2

7. Podsumowanie

Otrzymane wyniki symulacji numerycznej pozwalają ocenić poziom naprężeń w materiale gradientowym poddanym szokowi termicznemu. Pozwalają na świadome kształtowanie odporności termicznej barier cieplnych, nie tylko modyfikując ich grubość, ale również skład chemiczny warstw.

Zestawienie wyników symulacji numerycznej i eksperymentu pokazuje niewielkie różnice w przebiegach wykresów temperatur. Według autorów ma to związek z kilkoma przyczynami, z których do najważniejszych zaliczają:

- bezwładność cieplna urządzeń pomiarowych,
- zbyt uproszczony model przewodzenia ciepła przyjęty do obliczeń,
- burzliwy przebieg zjawisk towarzyszących przepływowi substancji chłodzącej mogący mieć wpływ na warunki brzegowe,
- przyjęcie danych materiałowych aluminy i cyrkonii na podstawie literatury oraz wykorzystanie teorii mieszanin.

Literatura

- [1] Tomba, A. G., L.Cavaliere, A., *Numerical simulation of the thermal shock of alumina disks with different surface finish*, Journal of the European Ceramic Society 21, 2001.
- [2] Tomba, A. G., Cavaliere, A. L., *Evaluation of the heat transfer coefficient in thermal shock of alumina disks*, Material Science and Engineering A276, 2000.
- [3] Tomba, A. G., Cavaliere, A. L., *Alumina discs with different surface finish: thermal shock behavior*, Journal of the European Ceramic Society 20, 2000.
- [4] Munro, R. G., *Evaluated Material Properties for a Sintered α -Alumina*, Journal of the European Ceramic Society 80, 1997.
- [5] Sadowski T., Neubrand A., *Estimation of the Crack Length After Thermal Shock in FGM Strip*, International Journal of Fracture 127, 2004.
- [6] Sadowski, T., Samborski, S., *Prediction of the mechanical behaviour of porous ceramics using mesomechanical model ling*, Computational Materials Science 28, 2003 Journal of the European Ceramic Society 26 (2006) 2527–2531, 2006.
- [7] Tomba, A. G., Camerucci, M. A., Cavaliere, A. L., *Indentation crack profiles of cordierite materials under mechanical and thermal biaxial stresses*, Journal of the European Ceramic Society 26, 2006.
- [8] Tomba, A. G., Cavaliere, M. A. L., *Ceramic surface finish: its influence on the heat transfer in thermal shock tests*, Materials Letters 42, 2000.
- [9] Panda, P. K., Kannan, T. S., Dubois, J., Olagnon, C., Fantozzi, G., *Thermal shock and thermal fatigue study of alumina*, Journal of the European Ceramic Society 22, 2002.
- [10] German J., *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*, Politechnika Krakowska, 2007.
- [11] Sadowski, T., Boniecki, M., Nakonieczny, K., *Theoretical prediction and experimental verification of temperature distribution in FGM cylindrical plates subjected to thermal shock*, IWCMM16, 2006.
- [12] Keyword Manual 970 Volume 1&2, Livermore Software Technology Corp, <http://www.lstc.com/>.
- [13] Theory Manual 2006, Livermore Software Technology Corp, <http://www.lstc.com/>.
- [14] <http://kmiis.wme.wat.edu.pl>.

