

Kamil Babski¹, Anna Boczkowska², Katarzyna Konopka³

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

Grzegorz Krześciński⁴

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa

Krzysztof J. Kurzydłowski⁵

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

OKREŚLANIE NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH KOMPOZYTÓW CERAMICZNYCH INFILTROWANYCH ELASTOMERAMI

Przedmiotem badań był kompozyt ceramiczno-elastomerowy wytwarzany w procesie infiltracji porowatej ceramiki elastomerem. Charakteryzuje się on znacznie większą odpornością na kruche pękanie i wyższą wytrzymałością na ściskanie niż porowata ceramika. Dzięki wysokoelastycznym odkształceniom elastomeru oraz perkolacyjnej strukturze kompozytu nie ulega on katastroficznemu zniszczeniu i zachowuje zdolność przenoszenia obciążeń w warunkach wysokich odkształceń. W procesie wytwarzania kompozytu płynna mieszanina substratów elastomeru jest wprowadzana w pory materiału ceramicznego w warunkach obniżonego ciśnienia i podwyższonej temperatury. Reakcja utwardzania elastomeru prowadzona jest w porach materiału ceramicznego w temperaturze 120°C. Różnice współczynników rozszerzalności termicznej elastomeru i ceramiki powodują powstawanie naprężeń własnych (NW) w trakcie chłodzenia kompozytu do temperatury otoczenia. Dodatkowym czynnikiem generującym naprężenia może być skurcz elastomeru podczas jego utwardzania. Generowane naprężenia mogą mieć istotny wpływ na właściwości mechaniczne kompozytu.

Opracowano modele kompozytu oraz przeprowadzono symulacje komputerowe z użyciem metody elementów skończonych (MES) w celu analizy NW powstających w procesie wytwarzania kompozytu. W modelach uwzględniono uproszczony współczynnik kształtu cząstek elastomeru jako zmianę z kształtu kulistego do eliptycznego. Udział objętościowy elastomeru był stały dla wszystkich przypadków i wynosił 0,4.

Opracowane modele poddano symulacji chłodzenia kompozytu od temperatury wytwarzania (120°C) do temperatury otoczenia (20°C). Obliczenia prowadzone były w programie *Ansys*. Stwierdzono, że zmiany temperatury prowadzą do powstawania wysokich naprężeń o charakterze rozciągającym w elastomerze oraz o charakterze rozciągającym i ściskającym w ceramice. Przeprowadzono symulacje obciążenia termicznego i rozciągania kompozytu. Stwierdzono korzystny wpływ NW na wytrzymałość kompozytu przejawiający się głównie obniżeniem maksymalnych wartości naprężeń rozciągających w ceramicznej osnowie. Stwierdzono wpływ kształtu cząstek na lokalny wzrost naprężeń ściskających, który może korzystnie wpływać na odporność na pękanie ceramiki.

Słowa kluczowe: kompozyt ceramiczno-elastomerowy, naprężenia własne, metoda elementów skończonych, infiltracja

FINITE ELEMENT MODELLING OF THE RESIDUAL STRESS IN THE CERAMIC-ELASTOMER INFILTRATED COMPOSITES

The ceramic-elastomer composites obtained via infiltration of porous SiO₂ ceramics by urea-urethane elastomer were obtained and studied (Fig. 1). Such composites are distinguished by the high compression strength and ability to achieve large deformations. The liquid mixture of the substrates is incorporated into ceramic pores using the vacuum pressure and temperature of 120°C. Since the thermal expansions of the elastomer and ceramics are different upon cooling to ambient temperature thermal stresses are generated (Tab. 1). Moreover, the elastomer shrinks as a consequence of its transformation from the mixture of substrates in the liquid to the solid states. These two phenomena result in buildup of residual stresses in the composite what can affect on the composite mechanical properties.

In this work numerical models of composite were developed and analysis of the residual stresses arising during fabrication process was reported. To calculate the residual stresses the Finite Element Method (FEM) was used. In the models the shape ratio was involved with a change of elastomeric particles shape from spherical to ellipsoidal (Fig. 2). The volume fraction was constant for all cases and equal to 0.40.

The unit cells were subjected to thermal load simulating the cooling from fabrication (120°C) to room temperature (20°C). The stresses distributions in dual phases component material were calculated using *Ansys* software. The analysis of distribution of principal stresses shows that change of temperature leads to buildup of high tensile stresses in elastomeric phase and tensile and compressive stresses in ceramic phase (Fig. 3). The simulation of both thermal and tensile load of unit cell were made. It was found that the thermal stresses present in composite mostly reduce the maximum values of tensile stresses in ceramic (Fig. 5). The elastomeric particles shape changes can lead to local increase of compressive stresses on parallel direction to ceramic-elastomer interface (Fig. 6). It can be advantageous from the mechanical point of view and can lead to increasing of the resistance for brittle cracking and composite strength.

Key words: ceramic-elastomer composites, residual stresses, Finite Element Method, infiltration

¹ mgr inż., ^{2,3,4} dr inż., ⁵ prof. dr hab. inż.

WSTĘP

Kompozyty ceramika-elastomer otrzymywane są w procesie infiltracji, w wyniku której powstaje struktura tzw. perkolacji faz. Kompozyt wykazuje znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do porowatej ceramiki [1]. Charakteryzuje się dużą sztywnością w zakresie nieprzekraczającym krytycznych naprężeń niszczących ceramiczną osnowę. Po zniszczeniu ceramicznego szkieletu rolę osnowy przejmuje elastomer, dzięki czemu kompozyt ulega dużym i w znacznej mierze odwracalnym odkształceniom przy jednoczesnym zachowaniu kohezji i zdolności do przenoszenia naprężeń [2, 3].

Proces infiltracji polega na wprowadzeniu elastomeru w pory ceramicznych kształtek, w których w podwyższonej temperaturze przebiega reakcja utwardzania. Ze względu na znaczne różnice współczynników rozszerzalności termicznej użytych materiałów, w trakcie chłodzenia po zakończonej reakcji utwardzania, w strukturze kompozytu powstają termiczne naprężenia własne (NW), co może prowadzić do zwiększenia lub zmniejszenia właściwości wytrzymałościowych.

O charakterze wpływu NW decyduje rozkład pola naprężeń, jego gradienty oraz wartości skrajne. NW poprzez sumowanie się z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych mogą wpływać na wytrzymałość materiału i konstrukcji. Mogą także oddziaływać z elementami mikrostruktury, co ma szczególne znaczenie dla inicjacji i propagacji pęknięć. NW mogą być wprowadzane do materiału celowo - powodując z punktu widzenia wytrzymałości bardziej racjonalną jego pracę, mogą być także nieodłącznym i niepożądanym efektem zastosowanej obróbki czy metody wytwarzania [4, 5].

Ze względu na budowę i sposób wytwarzania kompozytu ceramika-elastomer naprężenia własne mogą powstawać w dwóch etapach:

- w trakcie chłodzenia po zakończeniu reakcji poliaddycji prowadzonej w temperaturze ok. 120°C, z uwagi na różnice we współczynnikach rozszerzalności cieplnej ceramiki oraz elastomeru,
- podczas reakcji utwardzania elastomeru, z uwagi na skurcz polimeru.

Przyjęto, że z powodu wysokiej temperatury reakcji utwardzania oraz charakteru wysokoelastycznych odkształceń elastomeru naprężenia powstające w wyniku reakcji poliaddycji mogą ulegać relaksacji, dlatego nie zostały uwzględnione w modelowaniu. Ograniczono się jedynie do naprężeń termicznych.

Określenie wartości i rozkładu naprężeń własnych w kompozytach ceramicznych infiltrowanych elastomerami niewątpliwie przyczyni się do lepszego poznania i zrozumienia związków pomiędzy metodą wytwarzania a mikrostrukturą i właściwościami takich kompozytów.

Do wyznaczenia rozkładu powstających NW zastosowano symulację komputerową z wykorzystaniem me-

tody elementów skończonych (MES). Modelowanie MES może stanowić uzupełnienie dla metod eksperymentalnych lub być dla nich alternatywą, tam gdzie bezpośrednie pomiary NW nie są możliwe [6-9]. Opracowano przestrzenne modele kompozytu ceramika-elastomer, które posłużyły do określenia rozkładu powstających naprężeń termicznych. W modelach uwzględniono udział objętościowy składników oraz uproszczony geometryczny współczynnik kształtu. Przeprowadzono także symulację rozciągania kompozytu i przeanalizowano wpływ NW na powstające koncentracje naprężeń.

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Porowate kształtki ceramiczne służące do wytworzenia kompozytu spiekane były z frakcjonowanego piasku kwarcowego (SiO_2) z niewielkim dodatkiem szkła sodowo-wapniowego stanowiącego spoiwo wysokotemperaturowe. Próbkę miały kształt walca o wymiarach ok. 20x20 mm i charakteryzowały się porowatością otwartą na poziomie 40%. Kompozyt otrzymywano poprzez infiltrację porowatych spieków elastomerem nitylomocznikowouretanowym (PNMU). W tej metodzie płynna mieszanina reakcyjna substratów elastomeru wprowadzana jest w pory tworzywa ceramicznego w warunkach obniżonego ciśnienia, a następnie poddawana reakcji poliaddycji przez okres 16 h w temperaturze 120°C. Właściwości składników kompozytu przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Właściwości mechaniczne SiO_2 i elastomeru PNMU
TABLE 1. Mechanical properties of SiO_2 and elastomer PNMU

Właściwość \ Materiał	Ceramika SiO_2	Elastomer PNMU
E , MPa	47 000	27
ν	0,23	0,49
λ , 1/K	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$210 \cdot 10^{-6}$

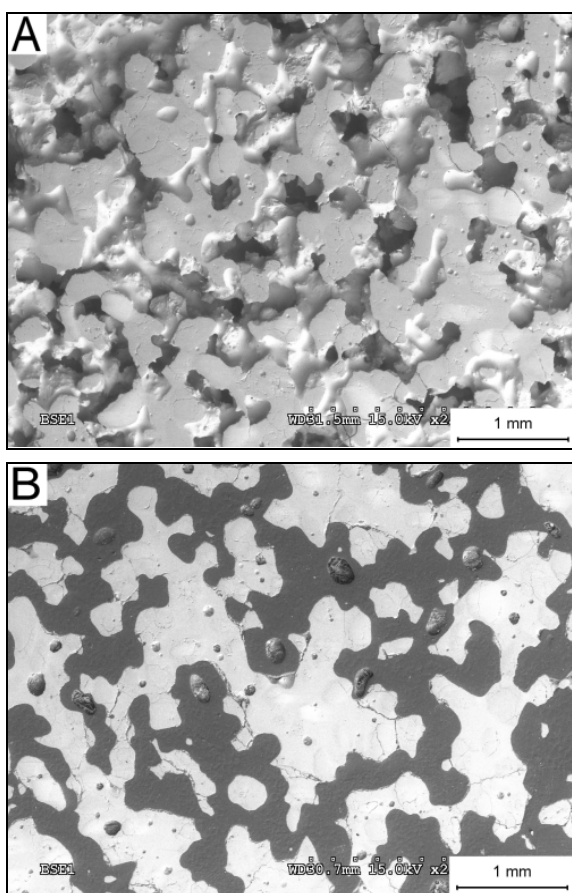
Przeprowadzono obserwacje przekrojów porowatej ceramiki i kompozytów przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego HITACHI S-3500N.

W celu określenia naprężeń termicznych wykorzystano metodę elementów skończonych. Budowę modelu i obliczenia przeprowadzono w programie Ansys 6.1.

WYNIKI I DISKUSJA

Na rysunku 1 przedstawiono typową strukturę przekroju porowatej ceramiki oraz kompozytu ceramiczno-elastomerowego.

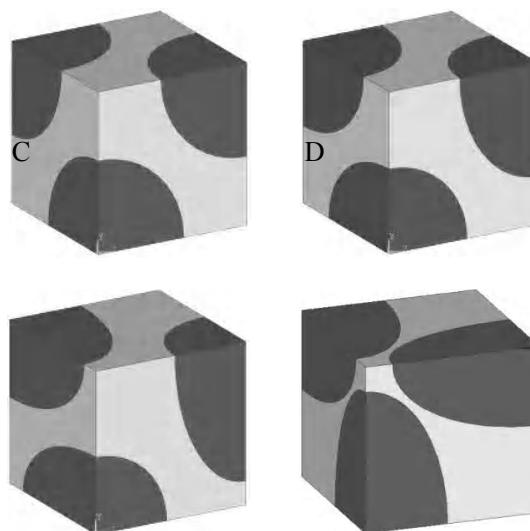
W celu uproszczenia przyjęto, że pory mają kształt kulisty lub elipsoidalny, a model kompozytu składa się z cząstek elastomeru równomiernie rozmieszczonych w ceramicznej osnowie. Założono, że obie fazy są trwałe połączone. Analizowano trzy typy modeli, różniących się między sobą kształtem (wydłużeniem) cząstek elastomeru. W obrębie tego samego modelu wszystkie cząstki elastomeru mają taki sam kształt, a sposób ich rozmieszczenia przedstawiono na rysunku 2. Udział objętościowy elastomeru dla każdego modelu, wyznaczony na podstawie pomiarów porowatości otwartej ceramiki, wynosi 0,4. Najdłuższy wymiar przekroju cząstek wynosi odpowiednio: 0,5 (dla cząstki kulistej), 0,7 oraz 0,85 długości krawędzi komórki dla modeli 3 i 4. Dodatkowo model 4 charakteryzował się nierównomiernym rozmieszczeniem cząstek.



Rys. 1. Obraz SEM przekroju: A) porowatej ceramiki, B) kompozytu
Fig. 1. SEM image of the intersections: A) porous ceramic, B) composite

Dla przedstawionych modeli przeprowadzono analizę dwóch głównych składowych naprężenia σ_1 oraz σ_3 . Naprężenia σ_1 oraz σ_3 to odpowiednio maksymalna i minimalna wartość naprężenia występującego w materiale. W pracy skupiono się na maksymalnych i minimalnych naprężeniach obecnych w kompozycie, gdyż w aspekcie mikrostruktury i właściwości ceramiki mają one największe znaczenie. Dlatego też sposób prezentacji naprężeń σ_1 oraz σ_3 nie uwzględnia kierunku ich

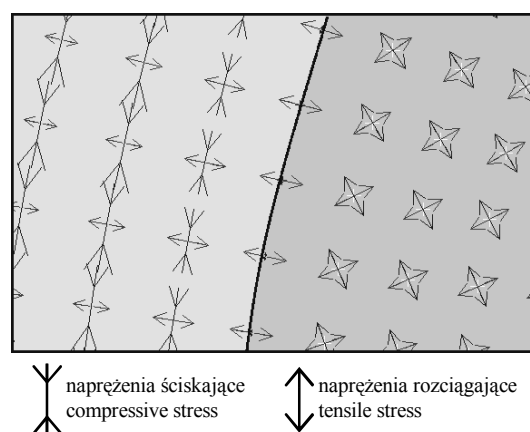
działania, lecz jedynie skrajne wartości naprężeń. Można przypuszczać, że orientacja kierunków działania naprężeń względem określonych elementów mikrostruktury (karów geometrycznych itp.) jest także istotna dla zjawisk osłabienia lub umocnienia materiału, jednakże w materiale rzeczywistym rozmieszczenie porów oraz ich wzajemna orientacja determinowane są czynnikami statystycznymi, a zbudowany model MES oraz prowadzona analiza nie uwzględniają precyzyjnie tych czynników.



Rys. 2. Elementarne komórki MES modelowanego kompozytu: A) model 1, B) model 2, C) model 3, D) model 4

Fig. 2. Representative unit cell FE models of composite: A) model 1, B) model 2, C) model 3, D) model 4

Charakter NW powstających podczas chłodzenia kompozytu w obrębie granicy połączenia ceramiki i elastomeru przedstawiono w sposób wektorowy na rysunku 3.

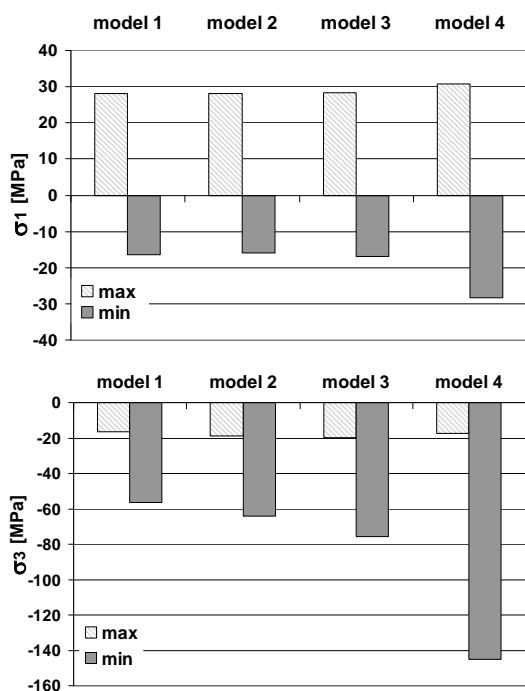


Rys. 3. Wektorowe przedstawienie NW w modelowanym fragmencie kompozytu ceramika-elastomer

Fig. 3. Vector plot of residual stresses at the ceramic elastomer interface sector

W elastomerze oba wektory składowych naprężeń są sobie równe, a ich dodatnie zwroty symbolizują rozciąganie. W ceramice obecne są naprężenia rozciągające, działające na kierunku normalnym do granicy międzyfazowej, oraz naprężenia ściskające, których kierunek działania jest styczny do powierzchni międzyfazowej.

Przeprowadzono symulację chłodzenia opracowanych modeli kompozytu. Na rysunku 4 przedstawiono wartości maksymalne i minimalne termicznych naprężeń głównych σ_1 i σ_3 .



Rys. 4. Skrajne wartości obliczonych naprężeń termicznych (naprężenia główne σ_1 i σ_3)

Fig. 4. Extreme values of calculated thermal stresses (principal stresses σ_1 and σ_3)

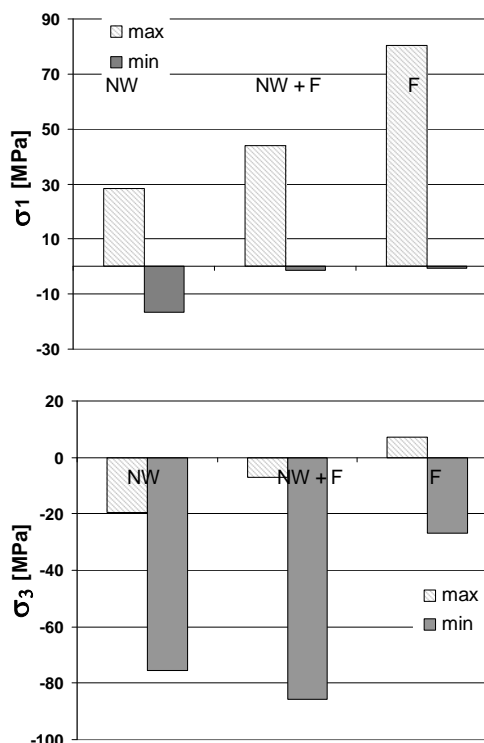
Porównując modele 1-3 można stwierdzić, że zmiany naprężenia σ_1 nie są znaczące i utrzymują się na podobnym poziomie. Wyraźna zależność zmian w funkcji kształtu cząstek widoczna jest dla naprężenia σ_3 . Wraz z wydłużaniem cząstek elastomeru maksymalne naprężenia ściskające rosną, a „-” świadczy o charakterze ściskającym. Najwyższe wartości naprężeń otrzymano w modelu 4. Spowodowane jest to nierównomiernym rozmieszczeniem cząstek, a najwyższe wartości NW pojawiają się w obszarze wpływu pól naprężeń pochodzących od trzech sąsiadujących cząstek elastomeru. Przedstawione na rysunku 3 wartości naprężenia występują w modelach lokalnie, w miejscach maksymalnych koncentracji.

W celu określenia wpływu NW na powstające wartości naprężeń w kompozycie poddanym działaniu sił zewnętrznych przeprowadzono obliczenia, w których model kompozytu poddano jednoosiowej próbie rozciągania. Obliczenia przeprowadzono na przykładzie modelu

3 (rys. 2). Obciążenie modelowanej komórki kompozytu wprowadzono na jednej ze ścian w postaci ciśnienia o wartości -20 MPa. Analizowano trzy przypadki, w których:

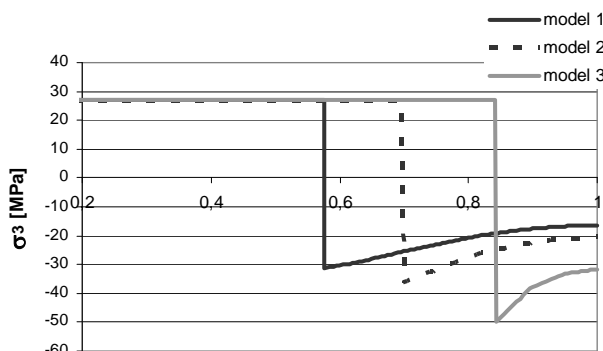
- w modelu obecne są tylko NW ($\Delta T = 100^\circ\text{C}$),
- w modelu obecne są NW i poddany jest on działaniu obciążenia zewnętrznego ($\Delta T = 100^\circ\text{C}$, $\sigma = 20$ MPa),
- model poddany jest tylko działaniu obciążenia zewnętrznego ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$, $\sigma = 20$ MPa).

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki tych analiz w postaci wartości maksymalnych i minimalnych naprężeń głównych σ_1 i σ_3 obliczonych na podstawie rozpatrywanego modelu.



Rys. 5. Skrajne wartości obliczonych naprężeń w modelu 3 (naprężenia główne σ_1 i σ_3); NW - termiczne naprężenia własne, NW+F - naprężenia własne i rozciąganie, F - rozciąganie

Fig. 5. Extreme values of calculated stresses in model 3 (principal stresses σ_1 and σ_3); NW - thermal residual stresses, T+NW - residual stresses and tension force, F - tension force



Rys. 6. Wpływ kształtu cząstki na naprężenie σ_3

Fig. 6. Effect of elastomeric particle shape on σ_3 stress

W modelach obserwowano silny wpływ promienia krzywizny cząstki, szczególnie na ściskające naprężenia obwodowe, zorientowane stycznie do powierzchni międzyfazowej. Na rysunku 6 porównano zmiany wartości naprężenia σ_3 wzdłuż ścieżki przechodzącej przez obszar największych zmian promienia cząstki elastomeru (małe ognisko elipsoidy).

Zmniejszenie promienia krzywizny cząstki powoduje wzrost naprężeń ściskających, co w konsekwencji może prowadzić do „zamykania” szczelin i ekranowania koncentracji naprężeń w jej wierzchołku. Zjawisko to może dodatkowo wpływać na ograniczanie inicjacji i propagacji pęknięć w ceramice.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Symulacje komputerowe chłodzenia kompozytu przy użyciu metody elementów skończonych od temperatury wytwarzania do temperatury otoczenia pozwoliły otrzymać jakościowy i w pewnej mierze ilościowy opis powstających naprężeń własnych.

Na podstawie analizowanych modeli można stwierdzić, że zmiany temperatury prowadzą do powstawania wysokich naprężeń o charakterze rozciągającym w cząstkach elastomeru oraz o charakterze rozciągającym i ściskającym w ceramice. W wyniku przeprowadzonych symulacji rozciągania kompozytu stwierdzono korzystny wpływ NW na jego wytrzymałość, przejawiający się wprowadzeniem naprężeń ściskających w ceramicznej osnowie oraz obniżeniem maksymalnych wartości naprężeń powstających w osnowie podczas rozciągania.

Zmniejszenie promienia krzywizny cząstki elastomeru powoduje wzrost stycznych do granicy międzyfazowej naprężeń ściskających, co w konsekwencji może prowadzić do „zamykania” szczelin i obniżania koncentracji naprężeń w wierzchołkach karbów.

Złożoność procesów zachodzących w materiale podczas zabiegów technologicznych zmusza do stosowania wielu uproszczeń modelowych. Modele teoretyczne, mimo iż często bywają dalekim uproszczeniem rzeczywistego materiału, mogą być ważnym elementem analizy tworzenia się naprężeń własnych i poznania ich wpływu na strukturę materiału.

Określenie wartości i rozkładu naprężeń własnych w kompozytach ceramicznych infiltrowanych elastomerami niewątpliwie przyczyni się do lepszego poznania i zrozumienia związków pomiędzy mikrostrukturą a właściwościami takich kompozytów.

Autorzy artykułu dziękują Prof. Mikołajowi Szafranowi z Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej za konsultacje i współpracę w zakresie tworzyw ceramicznych.

Praca finansowana była ze środków KBN w ramach projektu badawczego nr 3T08E 00926.

LITERATURA

- [1] Boczkowska A., Konopka K., Schmidt J., Kurzydłowski K.J., Badania wpływu elastomeru i adhezji na wytrzymałość na ściskanie kompozytów ceramika-elastomer, *Kompozyty (Composites)* 2004, 4, 9, 41-47.
- [2] Szafran M., Lipiec W., Okowiak J., Konopka K., Kurzydłowski K.J., Nowe kompozyty ceramika-polimer o osnowie z ceramicznego tworzywa porowatego z tlenku glinu, *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 8, 335-342.
- [3] Konopka K., Boczkowska A., Szafran M., Kurzydłowski K.J., Mikrostruktura i właściwości kompozytów ceramika-elastomer, *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 7, 216-220.
- [4] Senczyk D., *Naprężenia własne - wstęp do generowania, sterowania i wykorzystania*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1996.
- [5] Choo H., Bourke M.A.M., Evolution of thermal residual stress in intermetallic matrix composites during heating, *Ceramic Engineering and Science proc. ACerS 2000*, 21(3).
- [6] Grabowski G., Sobierski L., Modelowanie rozkładu naprężeń cieplnych w materiałach ceramicznych na przykładzie kompozytu SiC-TiB₂, XXX Szkoła Inżynierii Materiałowej, Ustroń--Jaszowiec, 1-4 X 2002, Kraków AGH, 2002, 481-486.
- [7] Andrade-Campos A., Pinho-da-Cruz J.A.M., Teixeira-Dias F., Finite element modeling and analysis of residual stress in Al-SiC metal matrix composites with GiD®, www.gid.cimne.upc.es/2002/Papers/1_Andrade.pdf
- [8] Golański D., Modelowanie naprężeń własnych w kompozytach MMC z wykorzystaniem metody homogenizacji i techniki cyfrowej obróbki obrazu, *Kompozyty (Composites)* 2002, 2, 5, 354-358.
- [9] Ciupiński Ł., Wpływ naprężeń szczątkowych na własności mechaniczne kompozytów metalicznych wzmocnianych ceramicznym włóknem ciągłym, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2002.

Recenzent
Stanisław Wierzbiński

Podziękowania