

MODELOWANIE POLIKRYSTALICZNEJ CERAMIKI Z WARSTWAMI MIĘDZYZIARNOWYMI W STANACH JEDNOOSIOWEGO ROZCIĄGANIA

MODELLING OF POLYCRYSTALLINE CERAMICS MATERIAL CONTAINING INTERFACES UNDER UNIAXIAL STRESS STATE

W pracy przedstawiono model polikrystalicznego materiału ceramicznego, w którym ziarna połączone są poprzez cienkie warstwy o innych własnościach mechanicznych. Powoduje to powstanie niejednorodnych rozkładów deformacji oraz koncentracje naprężeń inicjujące mikrouszkodzenia.

Słowa kluczowe: polikrystaliczny materiał ceramiczny, odkształcenia wisko-plastyczne

Ceramic polycrystalline materials show non-linear and complex response to applied loads due to their internal structure. The inter-granular layers significantly change the material response. The aim of the paper is to present a new constitutive model for the case of uniaxial tension of the polycrystalline materials, including the inter-granular metallic layers that create its internal structure. The quasi-static deformation process of this material include description of : elastic deformation of brittle grains, elasto-plastic deformation of inter-granular layers and deformation due to micro-porosity development in layers.

Keywords: ceramic polycrystalline materials, elasto-plastic deformation

1. Wprowadzenie

Ceramiki polikrystaliczne wykazują nieliniowy i złożony sposób zachowania się pod wpływem działającego obciążenia. Fakt ten wynika z ich skomplikowanej struktury wewnętrznej. Badania eksperymentalne wykazują, że ważnym elementem struktury wewnętrznej materiału polikrystalicznego są cienkie warstwy (o skończonej grubości) pomiędzy ziarnami. Wymiary tych warstw są relatywnie małe w stosunku do wymiaru ziaren. Warstwy międzyziarnowe diametralnie zmieniają odpowiedź materiału w skali makro. Dla przykładu ziarna polikryształu mogą wykazywać cechy sprężysto-krucho, natomiast warstwy mogą charakteryzować się innymi cechami sprężystymi lub sprężysto-plastycznymi. Początkowa porowatość ma również znaczący wpływ na zachowanie się materiałów konstrukcyjnych.

Celem pracy jest sformułowanie nowego modelu konstytutywnego dla polikrystalicznej ceramiki z cienkimi warstwami, która poddana została obciążeniu w stanie jednoosiowego rozciągania. Rozpatrzono

no quasistatyczny proces deformacji, który obejmuje: sprężystą deformację ziaren, sprężysto-plastyczną deformację warstw międzyziarnowych i rozwój porowatości w warstwach.

Po to, aby uzyskać relacje konstytutywne zastosowano procedurę uśredniania po powierzchni elementu reprezentatywnego (RSE). Początkowa wewnętrzna struktura materiału otrzymana została na podstawie obserwacji mikroskopowych (SME). Ze względu na skomplikowaną strukturę wewnętrzną, do modelowania zachowania się kompozytu ceramiczno-metalowego zastosowano metodę elementów skończonych. Nieliniowe zagadnienie rozwiązano stosując podejście przyrostowe. Umożliwia to sporządzenie rozkładów naprężeń i deformacji w niejednorodnym materiale kompozytowym, pozwalając na określenie obszarów skoncentrowania naprężeń. Koncentracje te mogą powodować powstawanie i rozwój defektów wewnątrz materiału, co prowadzi do zniszczenia materiału.

2. Podstawy teoretyczne metody

Obserwacje mikroskopowe wskazują, że odkształcenia w rozpatrywanym materiale są małe. Dlatego też można postulować dekompozycję tensora prędkości odkształceń na składową opisującą zachowanie się sprężyste materiału $\dot{\epsilon}^e$ oraz wisko-plastyczne $\dot{\epsilon}^{vp}$

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{vp} \quad (1)$$

Odkształcenia wisko-plastyczne inicjują się w części metalowej kompozytu, gdy stan naprężenia w materiale spełni warunek plastyczności

$$F(\sigma, \epsilon^{vp}) = F_o \quad (2)$$

gdzie F_o odpowiada naprężeniom płynięcia plastycznego w stanie jednoosiowym. Reguła wisko-plastycznego płynięcia ma następującą postać

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \gamma \langle \exp[M(F - F_o)/F_o] - 1 \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (3)$$

γ jest tzw. parametrem lepkości.

Całkowity przyrost odkształceń wisko-plastycznych (przy zastosowaniu schematu uwikłanego – „implicit time step scheme”) dla chwili czasu $t^{(n)}$ jest równy

$$\Delta \epsilon^{vp(n)} = \dot{\epsilon}^{vp(n)} \Delta t^{(n)} \quad (4)$$

podczas gdy przyrost naprężeń $\Delta \sigma^{(n)}$ jest odpowiednio równy

$$\Delta \sigma^{(n)} = D : \Delta \epsilon^{e(n)} = D : (\Delta \epsilon^{(n)} - \Delta \epsilon^{vp(n)}) \quad (5)$$

natomiast przyrost przemieszczeń $\Delta d^{(n)}$ wyznaczamy według

$$\Delta d^{(n)} = [K_T^{(n)}]^{-1} : \Delta V^{(n)} \quad (6)$$

W powyższych relacjach $\Delta t^{(n)}$ oznacza przyrost czasu, D jest macierzą określającą cechy materiału, $K_T^{(n)}$ oznacza styczną macierz sztywności, natomiast $\Delta V^{(n)}$ nazywamy przyrostowymi pseudo-siłami.

Mając wyznaczone przyrosty naprężeń oraz przemieszczeń można wyznaczyć bieżące składowe stanu naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia.

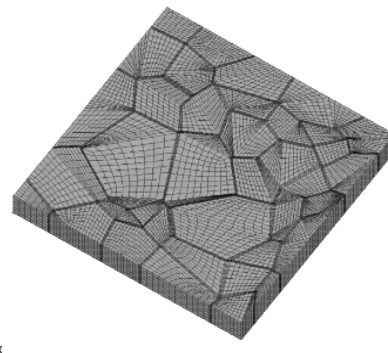
3. Przykłady obliczeniowe

3.1. Własności mechaniczne materiałów

W pracy rozpatrzono dwa rodzaje materiałów, których własności zestawiono w Tab. 1. W obydwu przykładach zakładamy, że ziarna wytworzone są z materiału sprężystego (Al_2O_3), natomiast warstwy międzyziarnowe w pierwszym przykładzie wytworzone zostały z materiału sprężystego o słabszych cechach wytrzymałościowych. W drugim przykładzie warstwy pomiędzy ziarnami stanowi materiał wisko-plastyczny.

3.2. Element reprezentatywny i schemat obciążenia

Na podstawie obserwacji mikroskopowych możliwe jest zamodelowanie struktury polikryształu metodą elementów skończonych. Rys. 1 przedstawia wewnętrzną strukturę materiału, natomiast Rys. 2 prezentuje teksturę warstw międzyziarnowych.

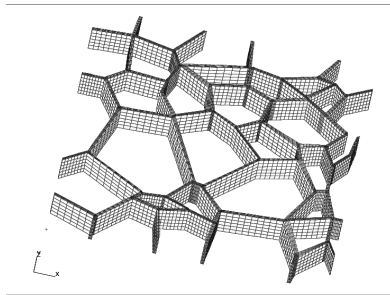


Rys. 1. Element reprezentatywny

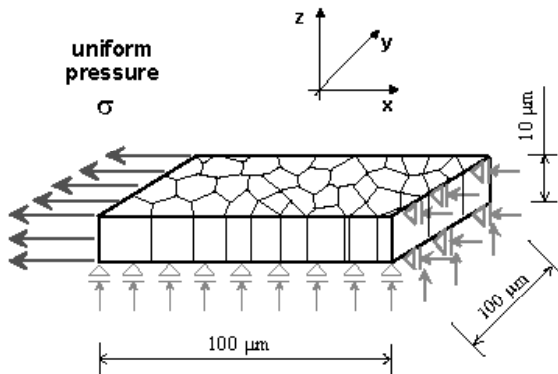
Schemat obciążenia elementu reprezentatywnego, stanem jednoosiowego rozciągania, pokazano na Rys. 3.

Tab. 1. Własności materiałów

Część polikryształ	Materiał w przykładzie 1	Materiał w przykładzie 2
Ziarna (materiał sprężysty - Al_2O_3)	$E_z = 4,1 \cdot 10^{11}$ Pa $\nu_z = 0.25$	
Warstwy międzyziarnowe	słabszy materiał sprężysty $E_w = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa $\nu_w = 0.235$	materiał plastyczny $E_w = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa $\nu_w = 0.235$ $\sigma_y = 2,97 \cdot 10^{10}$ Pa



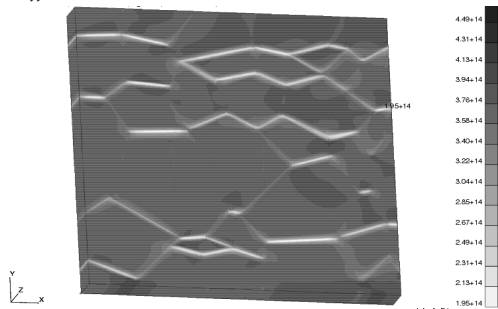
Rys. 2. Tekstura warstw międzyziarnowych



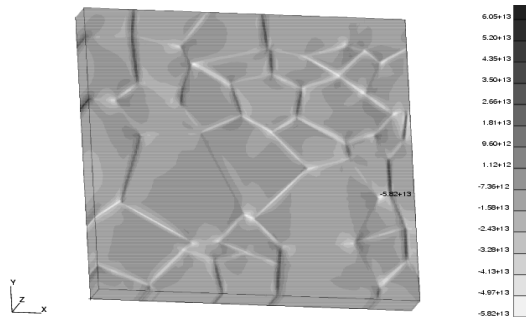
Rys. 3. Schemat obciążenia elementu reprezentatywnego

3.3 Rezultaty obliczeń numerycznych

Poniżej podano podstawowe rozkłady naprężeń i przemieszczeń charakterystyczne dla I przypadku materiału. Rys. 4 i 5 prezentują mapy naprężeń σ_{xx} oraz σ_{yy} .



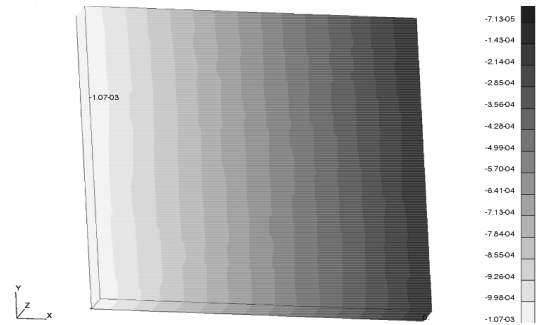
Rys. 4. Rozkład naprężeń wzdłuż kierunku obciążenia - x



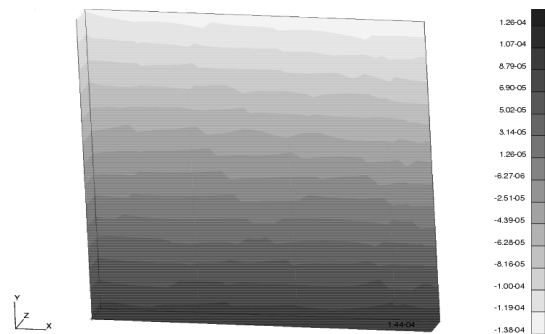
Rys. 5. Rozkład naprężeń w kierunku prostopadłym do obciążenia - y

Zarówno Rys. 4 jak i 5 pokazują wysoki stopień niejednorodności rozkładów naprężeń zarówno w płaszczyźnie xy jak i w kierunku prostopadłym z . Koncentracje naprężeń powstają w pobliżu krawędzi bocznych elementu reprezentatywnego jak również i w jego obszarze. Występują one w rozpatrywanym materiale w warstwach międzyziarnowych.

Niejednorodne są również rozkłady przemieszczeń, Rys. 6 i 7. Większą niejednorodność zauważamy w przypadku przemieszczeń u_y (Rys. 7).

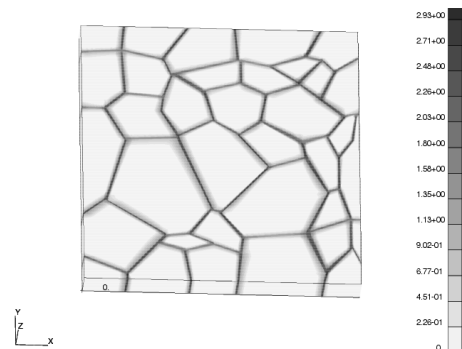


Rys. 6. Rozkład przemieszczeń w kierunku obciążenia - x



Rys. 7. Rozkład przemieszczeń w kierunku prostopadłym do obciążenia - y

W drugim przypadku, gdy warstwy międzyziarnowe w polikryształie wykonane są z materiału wiskoplastycznego, odkształcenia ϵ_{ij}^{vp} skoncentrowane są wyłącznie wzdłuż warstw pomiędzy ziarnami (Rys.8).



Rys. 8. Rozkład zastępczych odkształceń wiskoplastycznych

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwala sformułować następujące wnioski:

- istniejące w materiale warstwy pomiędzy ziarnami diametralnie zmieniają rozkłady naprężeń wewnątrz struktury polikrystalicznej,

- mikropustka znajdująca się w warstwie pomiędzy ziarnami powoduje powstanie koncentracji naprężeń rzędu 1.58.

5. Literatura

- [1] Davidge R.W.: *Mechanical Behaviour of Ceramics*. Cambridge University Press, London, 1979r.
- [2] Sadowski T., Samborski S.: *Modeling of Porous Ceramic Response to Compressive Loading*. J. Am. Ceram. Soc., 86(2003), 2218-2221.
- [3] Owen D.R.J., Hinton E.: *Finite Elements in Plasticity, Theory and Practice*. Pineridge Press Ltd. Swansea, UK, 1980r.
- [4] Perzyna P.: *Thermodynamic Theory of Viscoplasticity*, in Advances in Applied Mechanics, 11(1971)

Dr hab. inż. Tomasz SADOWSKI

Katedra Stereomechaniki Technicznej
Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej
Politechnika Lubelska

Dr Stephen HARDY

Dr Eligiusz POSTEK

School of Engineering
University of Wales Swansea
United Kingdom
