

Modelowanie odkształcania metalicznych materiałów porowatych z użyciem mikrotomografii komputerowej za pomocą MES

Michał Doroszko, Andrzej Seweryn

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Białostocka
email: m.doroszko@pb.edu.pl, a.seweryn@pb.edu.pl.

STRESZCZENIE: W pracy opisano numeryczne modelowanie odkształcania spieków porowatych stali 316L wykorzystujące mikrotomografię komputerową. W badaniach wykorzystano spiekaną stal o porowatości 41%, 33% oraz 26%. Do obliczeń numerycznych za pomocą metody elementów skończonych zastosowano trójwymiarowe modele geometryczne odwzorowujące przestrzenną mezostrukturę badanych materiałów porowatych uzyskaną na podstawie badań mikrotomograficznych. Z powodu ograniczonej dokładności mikrotomografu komputerowego, w pracy zaprezentowano wykorzystanie metod kompensujących niedokładność urządzenia pomiarowego w obliczeniach numerycznych. Wykorzystanie w badaniach modeli odwzorowujących rzeczywisty kształt porów pozwala na określenie wpływu deformacji struktury materiału w skali mezo na jego właściwości makroskopowe. W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano makroskopowe krzywe umocnienia materiału oraz porównano je z wynikami eksperymentalnymi. Ponadto przeanalizowano rozkłady naprężeń i odkształceń w zdeformowanym materiale oraz określono ich wpływ na proces zniszczenia.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda elementów skończonych, mikrotomografia komputerowa, materiały porowate, próba rozciągania.

1. Wstęp

W pracy opisano numeryczne modelowanie procesu odkształcania porowatych spieków 316L. Ze względu na niejednorodność kształtu porów uzyskanych w wyniku procesu spiekania z prasowaniem na zimno, trudnym zagadnieniem jest odtworzenie ich trójwymiarowego kształtu. Często w tym celu stosowana jest mikrotomografia komputerowa (micro-CT). W ostatnich latach powstało wiele prac opisujących modelowanie materiałów komórkowych na podstawie obrazów mikrotomograficznych [1-3]. Jednakże w przypadku spieków stali 316L, z powodu rozmiaru porów i gęstości materiału, uzyskiwana dokładność pomiarów micro-CT jest niewystarczająca. Na uzyskiwanych obrazach nie są odwzorowane małe pory i szczeliny mniejsze od dokładności urządzenia micro-CT. Skutkuje to zawyżonymi wartościami naprężenia uzyskiwanego w wyniku numerycznego modelowania procesu odkształcania badanych materiałów porowatych. Z tego powodu w niniejszej pracy wykorzystano i porównano trzy metody, dzięki którym niweluje się wpływ ograniczonej dokładności urządzenia micro-CT w obliczeniach numerycznych.

2. Porowate spieki 316L

Surowy materiał użyty do badań to proszek stali 316L o wielkości ziaren 125–250 μm uzyskany za pomocą metody rozpylania wodą (Sandvik Metinox Steel Ltd.). W wyniku procesu spiekania uzyskano spieki o porowatości 41%, 33% i 26% odpowiednio dla ciśnienia prasowania 200, 400 i 600 MPa [4].

W celu uzyskania informacji niezbędnych do zdefiniowania nieliniowości materiałowej w obliczeniach numerycznych, wykonano próby rozciągania litej stali 316L (Sandvik Sanmac 316/316L).

3. Metody modelowania

Z powodu ograniczonej dokładności urządzenia micro-CT na obrazach mikrotomograficznych nie zostały odwzorowane detale geometryczne mezostruktur poro-

watych o wielkości mniejszej niż 2,91 μm . W przypadku spieków porowatych otrzymywanych w wyniku spiekania z prasowaniem na zimno, są to małe pory i szczeliny pomiędzy sprasowanymi cząstkami. Brak ich odwzorowania powoduje zawyżenie wartości makroskopowego naprężenia nominalnego (uśrednionego) otrzymanego w wyniku obliczeń numerycznych deformacji badanych spieków [5]. Z tego powodu w badaniach wykorzystano i porównano następujące metody kompensujące niedokładność pomiarów mikrotomograficznych w obliczeniach numerycznych:

- Model I [6]: metoda zaproponowana przez Veyhl i in. (2013) polega na sztucznym zaniżeniu wartości modułu Younga oraz granicy plastyczności w modelu materiału, tak aby otrzymany moduł Younga uzyskany w wyniku obliczeń był zgodny z wynikami eksperymentu;
- Model II [7]: opracowany przez Doroszko i Seweryna (2015) polega na zawyżeniu porowatości modeli geometrycznych do momentu uzyskania zgodności modułu Younga otrzymanego numerycznie i eksperymentalnie;
- Model III: jego istotą jest modyfikacja obrazów mikrotomograficznych w celu odtworzenia małych porów i szczelin, które nie zostały odwzorowane w czasie pomiarów mikrotomograficznych.

Modyfikacje obrazów mikrotomograficznych oraz generowanie powierzchniowych siatek elementów skończonych wykonano w oprogramowaniu Avizo Fire. Do badań wygenerowano 9 modeli geometrycznych, po jednym dla każdej z metod i porowatości materiału.

4. Wyniki obliczeń numerycznych

W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych otrzymano nominalne krzywe umocnienia każdego z badanych spieków. Na rys. 1 porównano nominalne krzywe naprężenie-odkształcenie uzyskane za pomocą trzech modeli obliczeniowych oraz eksperymentu [9] dla porowatości materiału 26%. Krzywa o nazwie „Model wstępny” oznacza wyniki uzyskane bez użycia żadnej z metod niwelujących wpływ niedokładności pomiarów

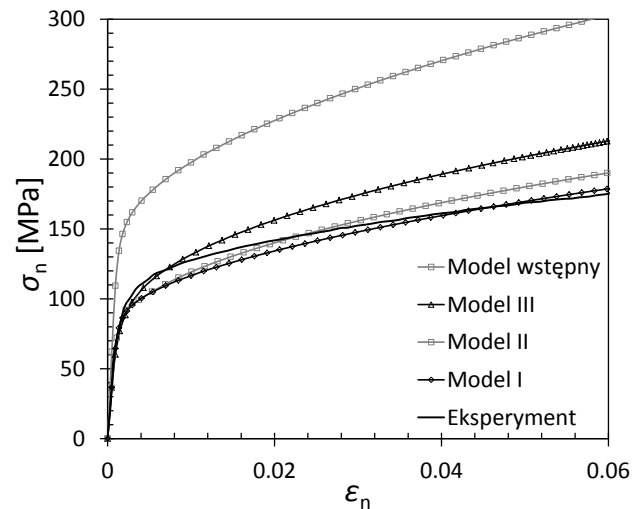
micro-CT. Krzywe pokazane na rys. 1 wskazują na znaczną poprawę zgodności wyników numerycznych z eksperymentem przez zastosowanie metod kompensujących niedokładność mikrotomografii komputerowej. Na podstawie krzywych określono wpływ niejednorodności materiałów na makroskopowe właściwości mechaniczne.

Na rys. 2 pokazano rozkłady naprężenia σ_1 w momencie uzyskania krytycznej wartości odkształcenia makroskopowego otrzymane za pomocą trzech modeli obliczeniowych dla materiału o porowatości 26%. Rozkłady naprężenia otrzymane za pomocą Modelu II i III wskazują na znacznie większą liczbę lokalizacji krytycznego naprężenia $\sigma_{1c} = 1510$ MPa, które powodowało inicjację pęknięcia litej stali 316L. Duża liczba lokalizacji mogłaby doprowadzić do zniszczenia makroskopowego spieku. Rosnąca rozbieżność krzywych naprężenie-odkształcenie pokazanych na rys. 1 jest spowodowana brakiem implementacji kryterium pęknięcia w obliczeniach numerycznych, ponieważ wraz ze wzrostem odkształcenia makroskopowego może dochodzić do pęknięcia mostków, a tym samym obniżenia wartości naprężenia nominalnego uzyskiwanego w kolejnych krokach.

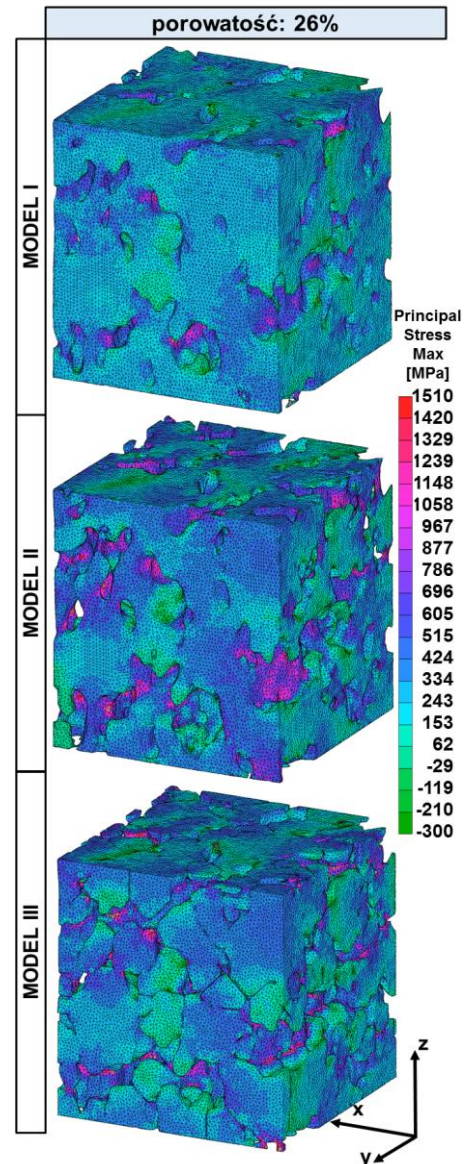
Praca została wykonana w ramach projektu nr S/WM/1/2013 realizowanego w Politechnice Białostockiej, finansowanego przez MNiSW.

Literatura

- [1] Cho H.-H., Cho Y., Han H. N., *Finite element analysis for mechanical response of Ti foams with regular structure obtained by selective laser melting*, Acta Materialia, Vol. 97, pp. 199–206, 2015.
- [2] Kwok K., Boccaccini D., Persson A. H., Frandsen H. L., *Homogenization of steady-state creep of porous metals using three-dimensional microstructural reconstructions*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 78–79, pp. 38–46, 2016.
- [3] Sulong M. A., Taherishargh M., Belova I. V., Murch G. E., Fiedler T., *On the mechanical anisotropy of the compressive properties of aluminium perlite syntactic foam*, Computational Materials Science, Vol. 109, pp. 258–265, 2015.
- [4] Grądzka-Dahlke M., *Analysis of the processes occurring during compression of the porous 316L steel for biomedical applications*, Maintenance and Reliability, Vol. 4, pp. 16–22, 2010.
- [5] Doroszko M., Seweryn A., *Modeling of the tension and compression behavior of sintered 316L using micro computed tomography*, Acta Mechechanica et Automatica, Vol. 32, pp. 70–74, 2015.
- [6] Veyhl C., Fiedler T., Jehring U., Andersen U., Bernthaler T., Belova I. V. i in., *On mechanical properties of sintered metallic fibre structures*, Materials Science and Engineering A, Vol. 562, pp. 83–88, 2013.
- [7] Doroszko M., Seweryn A., *Numerical modeling of the tensile deformation process of sintered 316L based on microtomography of porous mesostructures*, Materials & Design, Vol. 88, pp. 493–504, 2015.
- [8] Marc® 2010, Product Documentation, Volume B: Element Library.
- [9] Falkowska, A., Seweryn A., *Fatigue of sintered porous materials based on 316l stainless steel under uniaxial loading*, Materials Science, Vol. 51, No. 2, pp. 53–58, 2015.



Rys. 1. Nominalne krzywe naprężenie-odkształcenia otrzymane za pomocą trzech modeli obliczeniowych oraz eksperymentu [9] – porowatość 26%



Rys. 2. Rozkłady naprężenia σ_1 w momencie uzyskania krytycznej wartości odkształcenia makroskopowego otrzymane za pomocą trzech modeli obliczeniowych dla materiału o porowatości 26%