

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Numeryczne modelowanie i analiza procesu pęknięcia w skali mezo metali porowatych z użyciem obrazów mikrotomograficznych

Michał Doroszko<sup>1</sup>, Andrzej Seweryn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Białostocka

<sup>2</sup>Instytut Oceanotechniki i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska

email: m.doroszko@pb.edu.pl, andrzej.seweryn@pg.edu.pl

**STRESZCZENIE:** Niniejsza praca dotyczy numerycznego modelowania procesu odkształcania z uwzględnieniem lokalnego pęknięcia metalicznych spieków porowatych w skali mezoskopowej za pomocą metody elementów skończonych (FEM). W badaniach wykorzystano porowate spieki stali 316L. Do obliczeń zastosowano modele geometryczne odwzorowujące rzeczywisty kształt mezostruktury porowatej materiału uzyskane na za pomocą mikrotomografu komputerowego (micro-CT). Do modelowania procesu lokalnego pęknięcia (na poziomie mezostruktury) rozciąganych spieków porowatych wykorzystano znormalizowane kryterium ciągłości pęknięcia Cockrofta-Lathama. Obliczenia prowadzono do momentu inicjacji makropęknięcia w materiale. W pracy opisano procedurę modelowania numerycznego oraz wyniki przeprowadzonych obliczeń. Omówiono również wpływ struktury materiału na proces pęknięcia w skali mezo. Otrzymane numeryczne nominalne krzywe naprężenie-odkształcenie porównano z wynikami badań eksperymentalnych. Przeprowadzono również analizę pól naprężeń i odkształceń oraz ich zmienności wywołanej lokalnym pęknięciem w badanym materiale niejednorodnym.

**SŁOWA KLUCZOWE:** metoda elementów skończonych, rozciąganie, metale porowate, mikrotomografia, mezostruktura

#### 1. Materiały

Do badań opisanych w niniejszej pracy wykorzystano porowate spieki stali 316 L o różnych wartościach porowatości. Próbkę materiałów wykonano z proszku stali 316L o rozmiarze cząstek 125-250  $\mu\text{m}$ . Spieki otrzymano za pomocą metalurgii proszków, a dokładniej metodą spiekania z prasowaniem na zimno. W procesie prasowania na zimno zastosowano trzy średnie wartości ciśnienia 200 MPa, 400 MPa i 600 MPa, za pomocą których uzyskano różne porowatości materiału, odpowiednio 41%, 33% i 26% [1].

#### 2. Modelowanie numeryczne

W celu odwzorowania kształtu mezostruktury badanych spieków porowatych zastosowano mikrotomografię komputerową. Uzyskana dokładność pomiaru mikrotomograficznego jest niewystarczająca do odwzorowania detali struktury porowatej, takich jak szczeliny pomiędzy cząstkami spieczonego proszku stali 316L oraz małe pory o rozmiarze poniżej dokładności skanowania. Brak odwzorowania tych elementów mezostruktury ma znaczący wpływ na proces odkształcania i pęknięcia materiału oraz wartości naprężeń i odkształceń w zdeformowanym materiale [2]. Z tego powodu do modelowania procesu mezopęknięcia spieków porowatych stali 316 L wykorzystano metodę kompensującą niedokładność pomiaru mikrotomograficznego w obliczeniach numerycznych. Metoda ta polega na modyfikacji przekrojów tomograficznych poprzez zastosowanie sekwencji operacji przetwarzania obrazów w celu wygenerowania geometrycznego kształtu szczelin

między cząstkami spieczonego proszku, pominiętych przy pomiarach micro-CT [2]. Na podstawie zmodyfikowanych przekrojów tomograficznych wygenerowano trójwymiarowe modele geometryczne po jednym dla każdej z badanych porowatości materiału.

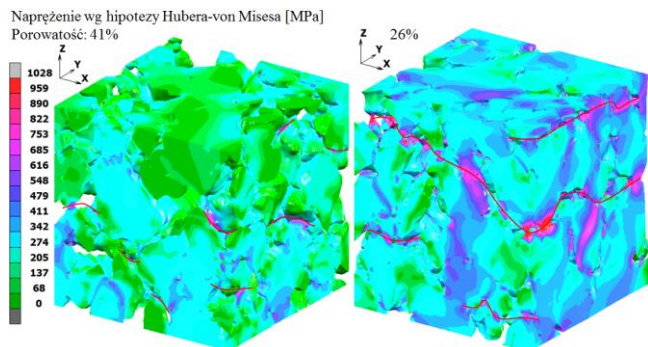
W opisanych badaniach wykorzystano symetryczne warunki brzegowe na 3 ścianach bocznych modeli MES poprzez przyłożenie do nich zerowych przemieszczeń węzłowych w kierunku normalnym do danej płaszczyzny. Rozciąganie modeli mezostruktur porowatych zrealizowano poprzez zadanie przemieszczeń węzłowych górnej ściany badanego modelu w kierunku dodatnich wartości osi z.

Do modelowania procesu odkształcania zastosowano sprężysto-plastyczny model materiału z zaimplementowanym kryterium pęknięcia. W obliczeniach przyjęto moduł Younga  $E_s = 202 \text{ GPa}$  i współczynnik Poissona  $\nu_s = 0,3$  otrzymane w wyniku badań eksperymentalnych litej stali 316 L. Zachowanie materiału pod obciążeniem w zakresie odkształceń plastycznych zdefiniowano za pomocą rzeczywistej krzywej naprężenie-odkształcenie plastyczne oraz zastosowanie warunku plastyczności Hubera-von Misesa. W celu uwzględnienia procesu lokalnego pęknięcia materiału w wyniku jego rozciągania, wykorzystano zaimplementowane w oprogramowaniu MSC.Marc, na poziomie elementu skończonego, znormalizowane kryterium pęknięcia ciągłości Cockrofta-Lathama [3, 4].

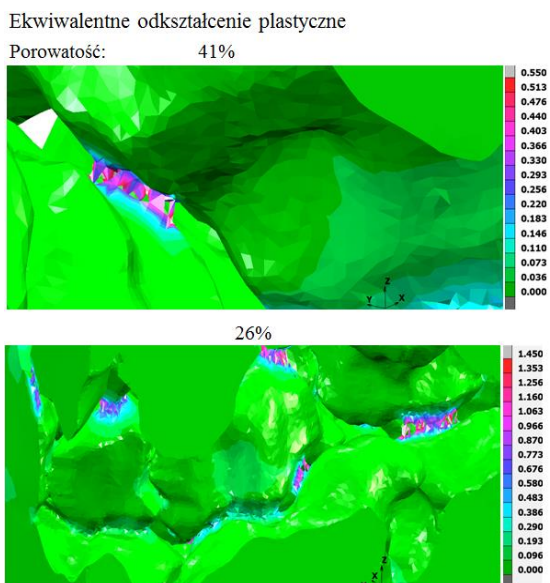
#### 3. Wyniki obliczeń numerycznych

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określono makroskopowe wartości właściwości wytrzymałościowych

badanych spieków, takie jak moduł Younga, granica plastyczności i maksymalne naprężenie nominalne. Określono również nominalne krzywe naprężenie-odkształcenie dla wszystkich badanych porowatości materiału. Zauważono, że wykorzystanie w modelu obliczeniowym zmodyfikowanego kryterium Cockrofta-Lathama spowodowało znaczące zwiększenie zbieżności krzywych numerycznych i eksperymentalnych w porównaniu do modelu uwzględniającego tylko sprężysto-plastyczny model materiału [5].



Rys. 1. Rozkład naprężenia wg hipotezy Hubera-von Misesa w materiałach o porowatości 41% i 26% w momencie inicjacji pęknięcia makroskopowego [5]



Rys. 2. Rozkład odkształcenia plastycznego w materiałach o porowatości 41% i 26% w momencie inicjacji pęknięcia makroskopowego [5]

Na rysunku 1 pokazano rozkłady naprężenia ekwiwalentnego wg hipotezy Hubera-von Misesa w materiale o porowatości odpowiednio 41% i 26% w momencie uzyskania maksymalnej wartości odkształcenia makroskopowego oraz lokalne pęknięcia mezostruktury podczas rozciągania. Tak jak w przypadku badań eksperymentalnych [5] zaobserwowano, że inicjacja pęknięcia badanych metali porowatych następuje w mostkach łączących spieczone cząstki proszku. W tych miejscach występuje również duża koncentracja naprężenia. Jest to spowodowane niewielkim rozmiarem przekroju poprzecznego mostków w stosunku do pozostałych części mezostruktury oraz kształtem korbów o małym promieniu

zaokrąglenia. Na rysunku 1 zaznaczono również czerwonymi liniami trajektorie pęknięć powstające w wyniku rozciągania. W przypadku porowatości materiału wynoszącej 41% pęknięcie następuje głównie po jednej płaszczyźnie, natomiast w spieku o porowatości 26% można wyznaczyć pasma sąsiadujących pęknięć, które mają decydujący wpływ na wytrzymałość i sztywność materiału na poziomie makro.

Na rysunku 2 pokazano rozkłady odkształcenia plastycznego w miejscach powstawania mezo-pęknięć w materiale w momencie uzyskania maksymalnej wartości odkształcenia makroskopowego. Z rysunku 2 wynika, że dla materiału o porowatości 41% wartości maksymalne doświadczalnej wartości odkształcenia makroskopowego są znacząco niższe (ponad 2 razy), niż dla pozostałych spieków. Jest to spowodowane między innymi znacznie większą liczbą lokalnych pęknięć i obniżeniem efektywnego modułu sprężystości materiału.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono procedurę i wyniki modelowania i symulacji numerycznych za pomocą metody elementów skończonych procesów odkształcania i pęknięcia mezostruktury spieków porowatych stali 316 L w warunkach jednoosiowego rozciągania. Na podstawie wykonanych i opisanych badań oraz analizy uzyskanych wyników można przedstawić poniższe wnioski.

- 1) Zaimplementowanie kryterium pęknięcia ciągliwego umożliwia symulację procesu lokalnego pęknięcia, w których osiągnięty został warunek krytyczny.
- 2) Modelowanie numeryczne poprawnie oddało fizyczny charakter pęknięcia rozciąganego materiału zaobserwowany za pomocą badań mikroskopowych.
- 3) W przypadku zastosowania kryterium Cockrofta-Lathama [4, 5] jego użycie w warunkach złożonego stanu obciążenia, gdzie nie jest dominujące rozciąganie, może prowadzić do dużych rozbieżności wyników obliczeń i badań eksperymentalnych.
- 4) Przedstawione w pracy podejście do modelowania i symulacji numerycznych za pomocą MES procesów odkształcania i pęknięcia mezostruktury spieków porowatych może być zastosowane także do innych materiałów niejednorodnych.

Praca została wykonana w ramach projektu Nr WZ/WM-IIM/3/2020 realizowanego w Politechnice Białostockiej i finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.

#### Literatura

- [1] Falkowska A., Seweryn A., Tomczyk A., *Fatigue life and strength of 316L sintered steel of varying porosity*, International Journal of Fatigue, Vol. 111, pp. 161-176, 2018.
- [2] Doroszko M., Seweryn A., *A new numerical modelling method for deformation behaviour of metallic porous materials using X-ray computed microtomography*, Materials Science and Engineering A, Vol. 689, pp. 142-156, 2017.
- [3] Cockcroft M. G., Latham D. J., *Ductility and the workability of metals*, Journal of the Institute of Metals, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
- [4] Oh S. I., Chen C.C., Kobayashi S., *Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing: Part 2 workability in extrusion and drawing*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 101, pp. 36-44, 1979.
- [5] Doroszko M., Seweryn A., *Numerical modelling of the mesofracture process of sintered 316L steel under tension using microtomography*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 255, 107965, 2021.