

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Tworzenie krzywej naprężenie-odkształcenie materiału sprężysto-plastycznego

Agnieszka Derewońko¹

¹Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: agnieszka.derewonko@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: Sprężysto-plastyczny model materiału w modelu numerycznym wymaga określenia zależności naprężenia w funkcji odkształcenia. Jedną z form takiej zależności jest krzywa sklejana. W artykule przedstawiono metodologię tworzenia krzywej naprężenie-odkształcenie, o ograniczonej liczbie punktów, na podstawie wyników eksperymentalnych testów jednoosiowego rozciągania. Przedstawiono przykłady zastosowania metodologii dla stopu aluminium i stali i efektów nieliniowych analiz numerycznych w programie MSC.Marc.

SŁOWA KLUCZOWE: metal sprężysto-plastyczny, MES, metodologia

1. Wyprowadzenie

Krzywa naprężenie-odkształcenie, stosowana w kryterium plastyczności Mohra-Coulomba, jest istotna w odniesieniu do różnych materiałów jak np. skał [1] lub betonu [2]. Opracowanie właściwego modelu takiej krzywej w oparciu o metodę elementów skończonych jest kluczowe dla uzyskania wyników analiz numerycznych odpowiadających rzeczywistemu zachowaniu konstrukcji [3]. Dwa nowe modele konstytutywne oparte na wynikach testów jednoosiowego rozciągania blach zaproponowano w pracy [4]. Sposób określania właściwości metali izotropowych w teście rozciągania został uregulowany normami m.in. ASTM [5].

W pracy przedstawiono sposób definiowania funkcji uplastycznienia w postaci krzywej sklepanej wymaganej algorytmem programu MSC.Marc, wyznaczonej w oparciu o wyniki testów jednoosiowego rozciągania. Opisano sposób jej tworzenia z użyciem programu Matlab. Zaprezentowano zastosowanie metodologii w odniesieniu do stopu aluminium PA7 oraz stali konstrukcyjnej S235.

2. Definiowanie krzywej uplastycznienia

Do wyznaczenia wartości modułu Younga i współczynnika Poissona oraz określenia krzywej uplastycznienia zgodnej z wymaganiami MSC.Marc wykorzystano procedurę napisaną w kodzie Matlab. Procedura ta złożona jest z następujących kroków:

- wczytanie danych pomiarowych oraz obliczenie odkształceń i naprężeń inżynierskich odpowiednio ε_n i σ_n ,
- eliminacja nieciągłości funkcji odkształceń i naprężeń inżynierskich zgodnie z kryterium,

$$\varepsilon_{ni} > \varepsilon_{ni-1} \wedge \sigma_{ni} > \sigma_{ni-1} \quad (1)$$

gdzie dolne indeksy odpowiadają wartościom dla czasów i i $i-1$.

- wybór danych i ich synchronizacja z zastosowaniem kryterium naprężeń,

$$\sigma_{na} - \sigma_{nb} < 10 \wedge \sigma_{na} - \sigma_{nc} < 10 \wedge \sigma_{nb} - \sigma_{nc} < 10 \quad (2)$$

gdzie ε_{na} i σ_{na} są odkształceniami i naprężeniami inżynierskimi w próbce a, ε_{nb} i σ_{nb} , w próbce b oraz ε_{nc} i σ_{nc} w próbce c,

- obliczenie średnich wartości ε_{nav} i σ_{nav} ,
- wyznaczenie wartości minimalnych inżynierskich odkształceń plastycznych przez wyznaczenie ekstremum oraz punktu przegięcia modułu Younga w funkcji odkształceń inżynierskich. Moduł Younga jest wyznaczany jako iloraz średnich odkształceń i naprężeń inżynierskich dla każdego przyrostu odkształceń,
- definicja zredukowanego wektora średnich odkształceń inżynierskich w zakresie plastycznym ε_{navz} . Wartość pierwszego elementu wektora jest równa wartości minimalnych średnich inżynierskich odkształceń plastycznych,
- utworzenie wektora średnich naprężeń inżynierskich w zakresie plastycznym σ_{navz} odpowiadających wektorowi ε_{navz} . Wektor jest tworzony przez interpolację sześcienną odcinkami z zachowaniem kształtu (Hermite'a) wartości odpowiadający punktom wektora ε_{navz} z użyciem polecenia *pchip* programu Matlab,
- obliczenie rzeczywistych naprężeń σ_{tavz} i odkształceń plastycznych ε_{tavz} z wektorów σ_{navz} i ε_{navz} wg zależności,

$$\sigma_{tavz} = \sigma_{navz} (1 + \varepsilon_{navz}) \quad (3a)$$

$$\varepsilon_{tavz} = \ln(1 + \varepsilon_{navz}) \quad (3b)$$

- obliczenie rzeczywistego modułu Younga E_t jako ilorazu pierwszych elementów wektorów σ_{tavz} i ε_{tavz} ,
- zdefiniowanie krzywej sklepanej rzeczywistego naprężenia w funkcji rzeczywistego odkształcenia plastycznego zgodnie z wymaganiami programu MSC.Marc. Rzeczywiste odkształcenia plastyczne obliczane są ze wzoru:

$$\epsilon_{tp}^M = \epsilon_{tavz} - \sigma_{tavz} / E_t \quad (4)$$

3. Przykłady zastosowania

Przedmiotem testów jednoosiowego rozciągania było po 5 próbek wiosełkowych wykonanych ze stopu aluminium PA7 oraz stali konstrukcyjnej S235. Na każdej próbce naklejono tensometry wzdłuż obu osi symetrii próbki. Do pomiarów wykorzystano również ekstensometr. Wyniki pomiarów rejestrowano z użyciem mostka tensometrycznego.

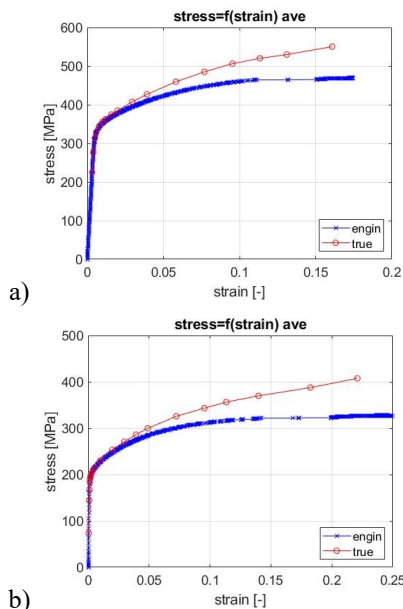
Próbki były mocowane symetrycznie w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 1. Model numeryczny próbki

Doświadczalne testy jednoosiowego rozciągania odwzorowano w analizach numerycznych przeprowadzonych w programie MSC.Marc. Modele próbek przygotowano z ośmiowęzłowych elementów bryłowych niższego rzędu. Obciążanie symulowano liniowo wzrastającym z prędkością 2 mm/min przemieszczeniem, odpowiadającym warunkom eksperymentu.

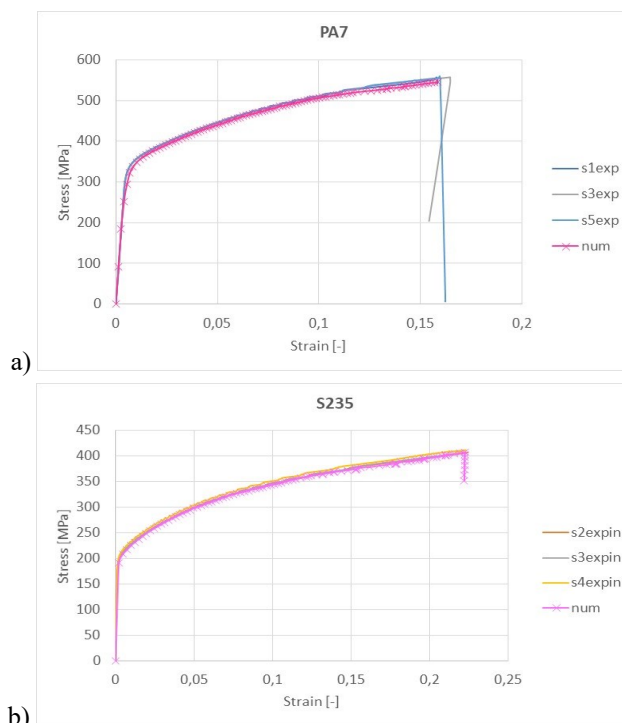
Opisana w punkcie 2 metodologia została użyta do utworzenia zredukowanych zależności $\sigma=f(\epsilon)$ dla stopu aluminium PA7 (rys. 2a) oraz stali konstrukcyjnej S235 (rys. 2b). Na rysunku 2 krzywe dla wielkości inżynierskich oznaczonych jako *engin* oraz zredukowaną krzywą wielkości rzeczywistych w zakresie plastycznym *true*. Na podstawie uzyskanych wykresów oraz stanu próbek po zniszczeniu, do synchronizacji danych wybrano po trzy próbki stopu aluminium i stali.



Rys. 2. Zestawienie krzywych $\sigma=f(\epsilon)$ z testów doświadczalnych i analiz numerycznych dla a) PA7 i b) S235

Zestawienie wyników analiz numerycznych z danymi eksperymentalnymi przedstawiono odpowiednio na rys. 3a dla PA7 i 3b dla S235. Na rysunku 3 krzywe z literami *exp*

na końcu dotyczą eksperymentu, natomiast *num* – analiz numerycznych.



Rys. 3. Zestawienie krzywych $\sigma=f(\epsilon)$ z testów doświadczalnych i analiz numerycznych dla a) PA7 i b) S235

4. Podsumowanie

- 1) Określenie wiarygodnej zależności $\sigma=f(\epsilon)$ wymaga synchronizacji danych z przeprowadzonych prób, przy założeniu odpowiedniego kryterium(ów).
- 2) W przedstawionej metodologii kluczowe jest właściwe utworzenie wektorów odkształceń plastycznych.
- 3) Nowatorskim elementem pracy jest sposób definiowania funkcji uplastycznienia materiału w postaci krzywej sklepanej wymaganej algorytmem programu Msc.Marc, wyznaczonej w oparciu o wyniki testów jednoosiowego rozciągania.

Praca została wykonana w ramach projektu Nr 752/2020, finansowanego przez WAT.

Literatura

- [1] Yanlin Zhao, Jingzhou Tang, Yu Chen, Lianyang Zhang, Weijun Wang, Wen Wan, Jianping Liao, *Hydromechanical coupling tests for mechanical and permeability characteristics of fractured limestone in complete stress-strain process*, Environ Earth Sci (2017) 76:24.
- [2] Weiqiang Wang, M. Neaz Sheikh, Ali Q. Al-Baali, Muhammad N.S. Hadi; *Compressive behaviour of partially FRP confined concrete: Experimental observations and assessment of the stress-strain models*, Construction and Building Materials 192 (2018) 785-797.
- [3] K Ilin, K A Yagotintsev, C Zhou, P Gao, J Kosse, S J Otten, W A J Wessel, T J Haugan, D C van der Laan and A Nijhuis, *Experiments and FE modeling of stress-strain state in ReBCO tape under tensile, torsional and transverse load*, Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 055006 (17pp).
- [4] Weilong Hu, Yanli Lin, Shijian Yuan, Zhubin He, *Constitutive models for regression of various experimental stress-strain relations*, International Journal of Mechanical Sciences 101-102(2015)1-9.
- [5] ASTM E 8-04. B209M-14.
- [6] Marc2019. Volume A: Theory and User Information. User Documentation.