

Cezary AJDUKIEWICZ ¹
Marcin GAJEWSKI ²

PRÓBA WERYFIKACJI RELACJI KONSTITUTYWNYCH SPRĘŻYSTO- PLASTYCZNOŚCI W TEŚCIE ROZCIĄGANIA PŁASKOWNIKA Z OTWORAMI PRZY WYKORZYSTANIU SYSTEMU OPTYCZNEJ KORELACJI OBRAZU

W pracy przedstawiono wyniki weryfikacji doświadczalnej symulacji numerycznych MES na przykładzie testu rozciągania płaskownika z pięcioma otworami w zakresie dużych odkształceń sprężysto-plastycznych. W badaniach doświadczalnych wykorzystano system optycznej korelacji obrazu ARAMIS. W wyniku przeprowadzonych analiz i porównań stwierdzono, że w przypadku materiałów izotropowych model materiału sprężysto-plastycznego z nieliniowym wzmocnieniem izotropowym i warunkiem plastyczności Hubera-Misesa zaimplementowany w ramach teorii dużych deformacji plastycznych jest użyteczny do przewidywania charakteru zniszczenia elementów konstrukcji metalowych. Należy podkreślić, że ten sam model zaimplementowany w teorii małych przemieszczeń nie pozwala na poprawne przewidywania jakościowe i ilościowe.

AN ATTEMPT TO VERIFY THE CONSTITUTIVE RELATIONSHIPS FOR ELASTIC-PLASTIC MATERIALS IN THE FLAT BAR TENSION TEST USING OPTICAL IMAGE CORRELATION SYSTEM

The paper presents results of experimental verification of numerical FEM simulations on the example of flat bar with five holes in stretching test for the large deformation elasto-plasticity theory. In experimental studies an ARAMIS image correlation optical system have been used. As a result of experimental analysis and comparisons with FEM solutions it was found that in the case of isotropic materials the constitutive model of elasto-plasticity with Huber-Mises yield condition and non-linear isotropic hardening implemented in ABAQUS software for relatively large deformation can be used to predict the sample behavior in the wide range of deformations. It is worth emphasizing that the same model implemented in the small displacement theory does not allow for accurate qualitative and quantitative predictions.

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Ładowej, 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16,
tel.: +48 22 234-57-54, e-mail: c.ajdukiewicz@il.pw.edu.pl

² PW WIL adres i tel. jak wyżej; e-mail: m.gajewski@il.pw.edu.pl

1. WSTĘP

W symulacjach numerycznych MES uwzględniających duże deformacje sprężysto-plastyczne bardzo istotne jest wybranie do analizy danego zadania właściwego modelu materiału i określenie parametrów tego modelu, por. [1,2]. W programach MES wykorzystywanych do analizy elementów konstrukcji, standardowo dostępnych jest wiele modeli konstytutywnych por. np. [3,4,5]. Stosowanie tych programów i procedur wymaga jednak od użytkownika głębszego zrozumienia zagadnienia, umiejętnego stosowania modeli konstytutywnych i właściwego przyjmowania parametrów w tych modelach. Niewłaściwe ich stosowanie prowadzi do błędnych wyników i interpretacji. Dlatego też wskazane jest przed wykonaniem analizy złożonego zagadnienia brzegowo-początkowego wykonanie testów mających na celu sprawdzenie: poprawności przyjęcia modelu materiału, wartości przyjętych parametrów i warunków brzegowo-początkowych. Najwłaściwszym sposobem sprawdzenia tej poprawności jest jednocześnie wykonanie analizy doświadczalnej i numerycznej prostego zagadnienia, a następnie dokonanie porównań otrzymanych wyników. W pracy przedstawiono przykład takiej weryfikacji.

Racjonalne projektowanie badań doświadczalnych mających na celu weryfikację numerycznych zadań brzegowego wymaga jednocześnie prowadzenia doświadczeń i symulacji numerycznych. Istotny jest kształt próbek, sposób obciążenia i warunki brzegowe. Wobec niejednorodności pól mechanicznych nawet właściwe umieszczenie tensometrów na próbkach może stanowić problem. Wyznaczenie więc, parametru czy funkcji materiałowej, wobec oczywistego wpływu warunków brzegowych i samej geometrii próbki może stanowić istotny problem.

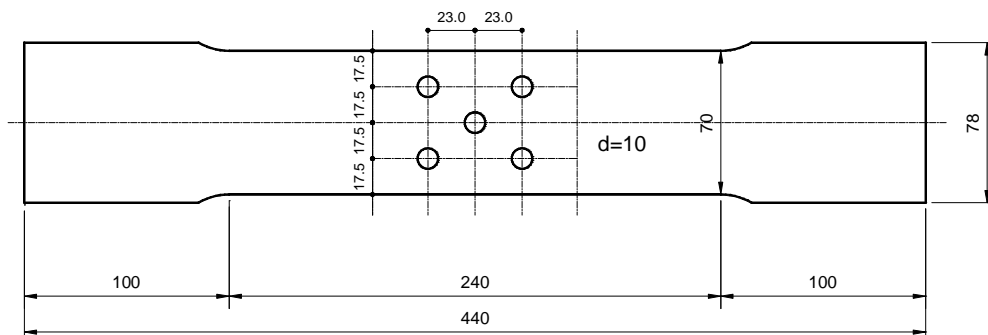
W artykule przedstawiono numeryczną analizę testu rozciągania płaskownika z otworami wykonanego z materiału sprężysto-plastycznego. Celem pracy jest weryfikacja doświadczalna modeli konstytutywnych sprężysto-plastyczności materiałów wstępnie izotropowych wybranych metali i ich zastosowanie w analizie elementów konstrukcji z wykorzystaniem MES. W niniejszej pracy zastosowano wybrane modele konstytutywne sprężysto-plastyczności materiałów wstępnie izotropowych w ramach teorii małych przemieszczeń jak i teorii dowolnych deformacji (umiarkowanie dużych deformacji sprężystych – w przypadku modelu zaimplementowanego w programie ABAQUS [5]). Parametry materiałowe do sformułowanych modeli przyjęto na podstawie wyników badań własnych.

Weryfikacji wyników symulacji dokonano przez porównanie ich z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu systemu optycznej korelacji obrazu ARAMIS [6]. System ten pozwala na śledzenie deformacji próbki w pewnym wybranym obszarze. Wyniki tych pomiarów porównano z wynikami rozwiązań numerycznych uzyskanych przy zastosowaniu metody elementów skończonych i programu ABAQUS [5].

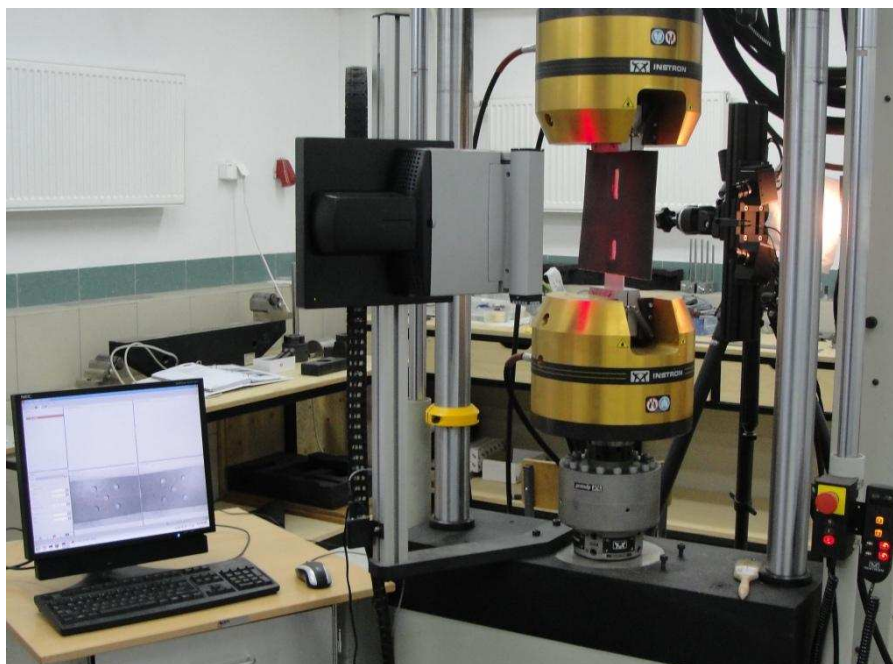
2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Elementem przyjętym do badań jest pasmo wykonane z blachy ze stopu aluminium EN AW-6060/63 (PA38). W paśmie tym o szerokości 70 mm i grubości 2 mm wycięto pięć otworów o średnicy 10 mm jak przedstawiono na Rys. 1.

Obszar pomiarowy dostosowano do najmniejszej z posiadanych próbek wzorcowych systemu ARAMIS tj. 100×75 mm. Ze względu na chęć objęcia badaniem jak największego obszaru próbki kamery ustawiono pionowo. Widok przygotowanego stanowiska do badań przedstawiono na Rys. 2.



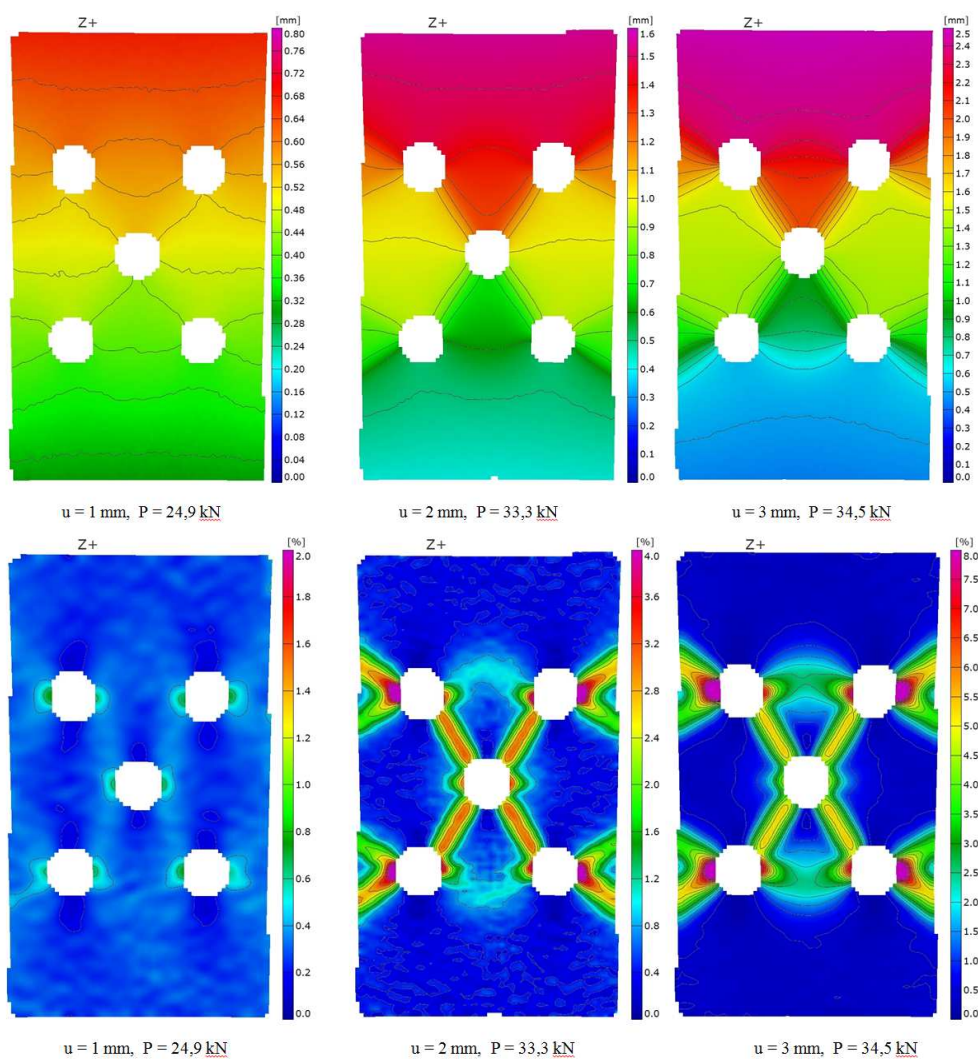
Rys.1. Pasma z otworami przyjęte w analizach doświadczalnych i MES



Rys.2. Widok stanowiska do badań systemem ARAMIS (pionowe ustawienie kamer)

Dane doświadczalne do modelu konstytutywnego wybranego materiału tj. stopu aluminium EN AW-6060/63 (PA380) określono na podstawie standardowych badań rozciągania oraz niestandardowego badania w postaci cyklicznego testu rozciągania (obciążenie – odciążenie). Test ten wykonano na posiadanej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8802 sterowanej programem Bluehill2 przy zastosowaniu procedury TestProfiler.

Próbka była rozciągana w sposób statyczny, gdyż założono prędkość przemieszczenia szczęki górnej o wartości 5 mm/min. Proces rozciągania próbki był rejestrowany tak, że co 1 s wykonywane było zdjęcie próbki wraz z wartością odpowiadającego przemieszczenia szczęk i aktualnej siły wypadkowej. Po zakończeniu badania, przy pomocy programu ARAMIS [6], dokonano analizy wykonanych zdjęć. Wyniki tych analiz przedstawiono na Rys. 3.



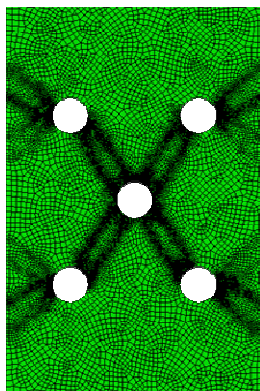
Rys. 3. Wybrane wykresy warstwowe normy przemieszczenia (górny rząd) i odkształceń ekwiwalentnych (rzęd dolny) przy różnych wartościach przemieszczenia (obciążenia)

Pogram ARAMIS pozwala na przedstawianie wyników analiz w bardzo różnorodny sposób. Z wielu możliwych wybrano prezentację w postaci warstwicznych map normy przemieszczeń i odkształceń ekwiwalentnych (Hubera-Misesa). Wybrane przykłady odpowiadające różnym wartościom przemieszczenia i obciążenia przedstawiono na Rys. 3. Obok każdej mapy znajduje się skala z wartościami jakim odpowiadają poszczególne kolory. Zdecydowano się na taką prezentację, gdyż w ten sposób możliwa będzie analiza porównawcza otrzymanych wyników z przedstawionymi dalej wynikami analizy MES.

3. SYMULACJA NUMERYCZNA

Zadanie brzegowe rozwiązano stosując sformułowanie teoretyczne dostępne w programie ABAQUS i dopuszczające umiarkowane duże deformacje w zakresie sprężystym, co jest konsekwencją zastosowania relacji konstytutywnej analogicznej do związku Hooke'a z logarytmicznymi miarami odkształceń. W analizie przyjęto warunek plastyczności Hubera-Misesa i stowarzyszone z nim prawo płynięcia oraz uwzględniono nieliniowe wzmocnienie izotropowe [3].

Zadanie określono następująco: rozciągany płaskownik wykonany ze stopu aluminium EN AW-6060/63 (PA38) przedstawiony na Rys. 1. o długości 260 [mm] i szerokości 70[mm] z otworami. Płaskownik zamodelowano jako tarczę PSN, co przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Siatka MES i elementy w przypadku modelu rozciąganego płaskownika

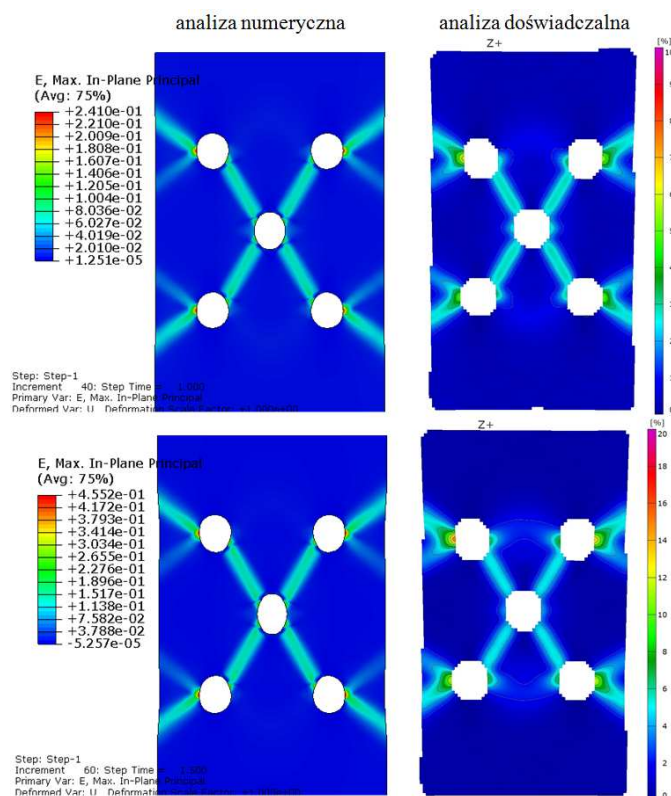
W tarczy przyjęto adaptacyjną siatkę elementów skończonych, na brzegach pionowych lewym i prawym przyjęto zerowe naprężeniowe warunki brzegowe. Na brzegach dolnym i górnym węzły elementów CPS4 połączone sztywnymi elementami prętowymi R2D2 zapewniając niezmienność długości tych brzegów, tworząc tzw. ciało sztywne. Rozciąganie tarczy zrealizowano przez zablokowanie możliwości obrotu brzegów górnych i dolnych oraz wymuszeniu przemieszczenia pionowego o wartości $u_0 = 3.25$ [mm] (po 1.625[mm] w górę i w dół) tj. takiej jaką uzyskano w czasie badania opisanego w pkt. 2. Oznacza to, że przyjęto idealne warunki brzegowe, które powinny w przypadku jednorodnego materiału izotropowego sprężyste i plastycznie generować symetryczne pola i symetryczny mechanizm zniszczenia.

Zadanie rozwiązano stosując teorię małych przemieszczeń oraz teorię dużych deformacji. Wyniki obliczeń numerycznych i ich porównanie z wynikami badań

doświadczalnych przedstawiono na Rys. 5. i 6. Po lewej stronie każdego rysunku przedstawiono wyniki badań numerycznych w postaci map warstwicowych maksymalnego odkształcenia głównego otrzymanego, a po prawej wyniki analiz doświadczalnych wykonanych programem ARAMIS dla zadanych wartości przemieszczenia.

W wypadku teorii małych przemieszczeń sprężyste i plastyczne własności stopu aluminium opisano korzystając z opcji ELASTIC i PLASTIC programu ABAQUS/Standard, zakładając model izotropowego materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem izotropowym. Dane materiałowe przyjęto z testów doświadczalnych badanego stopu aluminium: $E = 70,9$ [GPa], $\nu = 0.33$ oraz granicę plastyczności $\sigma_p = 185$ [MPa]. Ponadto przyjęto, że materiał w trakcie deformacji plastycznej ulega tzw. izotropowemu wzmocnieniu, które jest opisane przez funkcję $\sigma_p(\alpha)$ gdzie

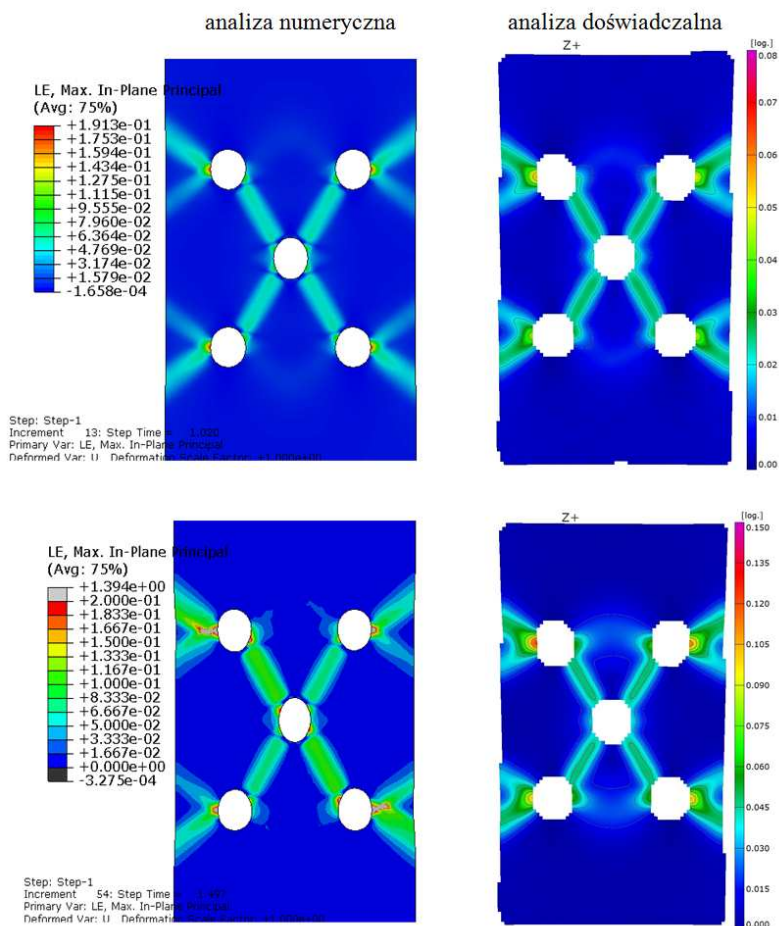
$$\alpha = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \|\dot{\epsilon}^p(\tau)\| d\tau, \text{ por. [2,3].}$$



Rys. 5. Wykresy warstwicowe składowych odkształceń głównych w konfiguracji przemieszczenia brzegu górnego dla $u = 2.0$ i 3.0 [mm] (teoria małych przemieszczeń)

Na przedstawionych mapach odkształceń głównych widać wysokie jakościowe podobieństwo otrzymanych wyników analiz numerycznych i doświadczalnych. Porównując

jednak przewidywania symulacji MES w ramach teorii małych odkształceń z eksperymentem należy zauważyć, że otrzymane wartości odkształceń głównych różnią się dość znacznie.



Rys. 6. Wykresy warstwiczne składowych odkształceń głównych w konfiguracji przemieszczenia brzoego górnego dla $u = 2.0$ i 3.0 [mm] (teoria dużych deformacji)

Prawdopodobnie możliwą drogą prowadzącą do poprawnej symulacji eksperymentu byłoby uwzględnienie ewentualnych anizotropowych własności materiału pod warunkiem, że kierunki główne anizotropii nie pokrywają się z kierunkami głównymi naprężeń w opisywanym teście rozciągania płaskownika. W niniejszej pracy ta droga nie jest jednak eksploatowana z powodu braku możliwości przeprowadzenia badań doświadczalnych umożliwiających wyznaczenie parametrów dla sprężystości i plastyczności materiałów ortotropowych.

Rozważane zadanie rozwiązano następnie w ramach teorii dużych deformacji zaimplementowanej w programie ABAQUS w ramach opcji NLGEOM. Dane dotyczące

plastycznych właściwości aluminium wprowadzono w ramach opcji PLASTIC, por. [2,3]. Opcja ta wymaga zamodelowania odcinkami prostymi zależności między naprężeniem rzeczywistym a odkształceniem logarytmicznym. Można stosować dowolną liczbę odcinków, co powoduje, że z zażądaną dokładnością aproksymujemy wyniki testu jednoosiowego rozciągania. Do modelowania wykorzystano dane ze wspomnianego w punkcie 2 eksperymentu.

Zadanie rozwiązano bez zakładania imperfekcji w ramach teorii dowolnych deformacji otrzymując poniżej przedstawione wyniki. Przedstawiono mapy warstwiczne wyników obliczeń odkształcenia głównego maksymalnego otrzymanego z analiz numerycznych i wyniki analiz doświadczalnych wykonanych programem ARAMIS dla zadanych wartości przemieszczenia. Odkształcenia te przedstawiono w mierze logarytmicznej.

4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych pasm aluminiowych z otworami oraz wyniki weryfikacji doświadczalnych wybranych modeli konstytutywnych sprężysto-plastyczności materiałów wstępnie izotropowych w analizie sprężysto-plastycznej wybranych elementów z wykorzystaniem MES

Do analizy wybrano stosunkowo proste modele konstytutywne, ze względu na możliwości techniczne przeprowadzenia badań wytrzymałościowych, z których określić można wolne parametry modeli. Weryfikacji doświadczalnej rozwiązań numerycznych dokonano przy pomocy systemu optycznej korelacji obrazu ARAMIS.

W wyniku przeprowadzonych analiz i porównań stwierdzono, że w przypadku materiałów izotropowych model materiału sprężysto-plastycznego z nieliniowym wzmocnieniem izotropowym i warunkiem plastyczności Hubera-Misesa zaimplementowany w ramach teorii dużych deformacji plastycznych jest użyteczny do przewidywania zachowania elementów konstrukcji metalowych. Jednak uzyskanie pełnej zgodności ilościowej i jakościowej wymaga przyjęcia bardziej złożonych modeli materiałów niż przyjęte w pracy

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Ajdukiewicz, M. Gajewski, S. Jemioło: Analiza numeryczna i eksperymentalna niestabilności lokalnych i globalnych przy ściskaniu rur aluminiowych. XXIII Symposium Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka, październik 2008.
- [2] Ajdukiewicz C., Gajewski M., Jemioło S.: Symulacja numeryczna testu rozciągania płaskownika z uwzględnieniem teorii sprężysto-plastyczności dużych deformacji, 55 Konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB "Kielce-Krynica", str. 15-22, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2009.
- [3] Lubliner J.: Plasticity theory. Macmillan Publishing Company, New York, 1990.
- [4] Simo J.C., Hughes T. J. R., Computational inelasticity, Springer- Verlag, Inc., New York, 1998.
- [5] ABAQUS Theory manual, Version 6.1., Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 2000.
- [6] ARAMIS v6 User Manual, GOM mbH, Mittelweg 7-8 D-38106 Braunschweig.