

Streszczenie¹

Celem badań jest opracowanie modeli zdolnych symulować niestateczności stacjonarne i propagujące się, ze szczególnym uwzględnieniem zależności od prędkości deformacji. Utrata stateczności może być spowodowana osłabieniem geometrycznym (związanym z dużymi odkształceniami), materiałowym (związanym z mikrostrukturą) i/lub termicznym (związanym ze zmianą parametrów materiałowych wraz ze zmianą temperatury). Może to spowodować lokalizację odkształceń, mającą formę pasma ścinania lub szyjki, która może następnie przekształcić się w pasma Luedersa lub efekt Portevin-Le Chatelier (PLC).

Pasma Luedersa pojawiają się, gdy na krawędzi pasma ścinania formuje się front plastyczny i zaczyna poruszać się wzdłuż próbki. Na wykresie zależności naprężenia nominalnego od odkształcenia średniego widoczna jest faza osłabienia, linia pozioma (kiedy pasmo się przemieszcza) oraz wzmocnienia (kiedy w całej próbce występuje ponownie równomierne odkształcenie). Efekt PLC jest związany ze zjawiskiem tak zwanego dynamicznego starzenia się odkształceń, ang. *Dynamic Strain Aging (DSA)*, które powiązane jest z ujemną zależnością od prędkości odkształcenia, ang. *negative strain rate sensitivity*. Na poziomie makro można zaobserwować tzw. seracje (powtarzające się naprzemienne fazy osłabienia i wzmocnienia) na wykresie siła-przemieszczenie oraz odpowiadające im pasma podróżujące przez próbkę. Na poziomie mikro najbardziej rozpowszechniona teoria głosi, że efekt PLC jest spowodowany przez interakcje pomiędzy atomami fazy rozproszonej oraz mobilnymi dyslokacjami podczas deformacji plastycznej. Pasma Luedersa oraz efekt PLC można obserwować w niektórych stopach stali i aluminium w pewnym zakresie prędkości odkształceń oraz temperatur. Pasma Luedersa mają charakter przejściowy, po nich może pojawić się w próbce efekt PLC. Wyłącznie dla symulacji efektu PLC założono w pracy konkretne dane materiałowe, natomiast dla pozostałych symulacji parametry odpowiadają materiałom metalicznym (stali) lub kompozytom.

W pierwszej części pracy obliczenia zostały przeprowadzone dla niestateczności stacjonarnych przy użyciu modeli dla dużych deformacji ze sprzężeniem termo-mechanicznym lub bez niego. Użyto trzech funkcji plastyczność: Hubera-Misesa-Henckiego, Burzyńskiego-Druckera-Pragera oraz Hoffmana. W analizie zostały uwzględnione różne wartości parametru wzmocnienia, przewodności, kąta tarcia wewnętrznego (dla funkcji plastyczności Burzyńskiego-Druckera-Pragera) oraz granicy plastyczności przy rozciąganiu (dla funkcji Hoffmana), jak również różne gęstości siatki elementów skończonych, warunki brzegowe (płaski stan odkształcenia lub naprężenia) oraz wymiary próbki (długość lub grubość). Dla większości przypadków, z powodu symetrii, tylko jedna ósma próbki jest modelowana, ale dla sprawdzenia jej zachowania również przypadek całej próbki został dodany.

Następnie zostały wykonane obliczenia dla pasm Luedersa zarówno dla rozciągania (próbka w kształcie płytki oraz próbka wiósełkowa) jak i ścinania (próbka o specjalnym kształcie) przy użyciu modeli z dużymi deformacjami z uwzględnieniem zależności od prędkości deformacji

¹Streszczenie szczegółowe znajduje się na końcu pracy

(lepko-plastyczność) lub gradientów wyższego rzędu dla przypadku izotermicznego lub z pełnym sprzężeniem termo-mechanicznym. Funkcja plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego została wyposażona w wieloliniowe wzmocnienie, które pozwala na symulację pasm Luedersa. Dla przypadku izotermicznego funkcja ta ma postać łamanej, natomiast dla termo-plastyczności jest kwadratowa. Różne wartości lepkości, wewnętrznej skali długości, przewodności oraz czasu trwania procesu (a tym samym szybkości odkształcenia) zostały wzięte pod uwagę, jak również trzy siatki o różnej gęstości (tylko dla próbki rozciąganej).

W trzeciej części pracy zgromadzone są symulacje wykonane dla efektu PLC. Model termo-lepko-plastyczny dla dużych deformacji, opcjonalnie wzbogacony o gradienty wyższego rzędu, jest używany w połączeniu z modelem Estrina-McCormicka odpisującym osłabienie prędkości odkształcenia (które jest fenomenologicznym opisem zjawiska DSA). Najpierw omówione zostały obliczenia dla próbki prętowej, które pokazują zachowanie modelu. Specjalną uwagę poświęcono pojedynczej seracji oraz ewolucji czasu starzenia się (aging time). Pozostałe symulacje zostały wykonane dla próbki wiosełkowej, a ich rezultaty porównano z literaturą. Dodatkowo została zaproponowana zależność czasu dyfuzji substancji rozpuszczonej od temperatury. Tej samej próbki użyto do analizy parametrycznej obejmującej różne wartości lepkości, przewodności, czasu trwania procesu (a tym samym prędkości deformacji), wewnętrznej skali długości, ciągliwości oraz sześciu parametrów modelu McCormicka. Symulacje wykazały dobrą zgodność w zakresie zależności naprężenia nominalnego do odkształcenia średniego, jakkolwiek na końcu procesu widoczne są nadmierne seracje. Założona zależność charakterystycznego czasu dyfuzji substancji rozpuszczonej od temperatury nie przybliżyła wyników symulacji do eksperymentów.

Na końcu pracy przedstawione zostały wyniki symulacji przeprowadzonych dla eksperymentów wykonanych w laboratorium w TU Dortmund. Rezultaty dla stopu aluminium AW5083 pokazują na początku pasma Lueders, które następnie przechodzą w saturacyjne wzmocnienie z charakterystycznymi dla efektu PLC seracjami. Aby odtworzyć zachowanie próbki eksperymentalnej, modele dla pasm Luedersa oraz dla efektu PLC zostały połączone. Eksperymenty i symulacje zostały wykonane w temperaturze pokojowej dla trzech prędkości deformacji. Ich wyniki porównano i uzyskano dobrą zgodność w zakresie wykresów siła-przemieszczenie (do momentu zniszczenia) oraz poziomów temperatury. Wielkość seracji oraz propagujące się strefy lokalizacji są również porównywalne.

Podsumowując, opracowane modele dla dużych deformacji są w stanie odtworzyć niestateczności oraz w szczególności uwzględnić wpływ prędkości deformacji na wyniki. Uzyskano dobrą zgodność pomiędzy wynikami eksperymentów i symulacji numerycznych.

Słowa kluczowe: niestateczności propagujące się, pasma Luedersa, efekt Portevin-Le Chate-lier, duże deformacje, lepko-plastyczność, sprzężenie termo-mechaniczne, gradienty wyższego rzędu, metoda elementów skończonych