

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy analizy procesu przemiany energii podczas deformacji materiałów krystalicznych. W procesie deformacji plastycznej część energii mechanicznej dostarczanej do deformowanego materiału magazynuje się w tym materiale, zwiększając jego energię wewnętrzną, a reszta ulega rozproszeniu w postaci ciepła. Miarą przemiany energii w danej chwili procesu deformacji jest parametr nazywany zdolnością magazynowania energii, definiowany jako stosunek przyrostu energii zmagazynowanej do przyrostu pracy odkształcenia plastycznego.

W rozprawie opracowano eksperymentalną metodykę wyznaczania powierzchniowych rozkładów składników bilansu energii, tj. pracy odkształcenia plastycznego oraz energii dyssypowanej w postaci ciepła w całym zakresie sprężysto-plastycznej deformacji, wykorzystując eksperymentalnie wyznaczone pola przemieszczenia i temperatury na powierzchni próbki (za pomocą metod korelacji obrazów cyfrowych (*Digital Image Correlation* DIC) i termografii podczerwieni (*Infrared Thermography* IRT)) oraz elementy teorii przepływu ciepła i teorii plastyczności. Rozprawa ma przede wszystkim charakter doświadczalny, ale zawiera także obliczeniowe aspekty dotyczące zarówno wyznaczania rozkładu naprężenia, jak i rozkładu źródeł ciepła. Eksperymentalnie wyznaczone pole gradientu przemieszczenia wykorzystano jako dane wejściowe do sprężysto-plastycznego modelu materiału, na podstawie którego uzyskano pole naprężenia i odkształcenia plastycznego, a w rezultacie – pracy odkształcenia plastycznego. Z kolei, pole energii dyssypowanej w postaci ciepła wyznaczono w oparciu o równanie przewodzenia ciepła w stanie nieustalonym, uwzględniając zarówno przepływ ciepła w próbce, jak i wymianę ciepła z otoczeniem. Wykorzystując ewolucję zmierzonego pola temperatury, wyznaczono wszystkie człony równania przewodzenia ciepła, w tym moc źródeł ciepła bez potrzeby rozwiązywania tego równania. Żeby uzyskać źródła ciepła w opisie materialnym (w układzie współrzędnych, w którym wyznaczano pola przemieszczenia), czyli wyrazić składniki bilansu energii w tym samym układzie współrzędnych, opracowano kilkietapową procedurę obliczeniową. W rozpatrywanym procesie deformacji energia dyssypowana w postaci ciepła jest dominującym, ale nie jedynym składnikiem źródeł ciepła. Dlatego uwzględniono również ciepło efektu piezokalorycznego oraz ciepło tracone do otoczenia na drodze konwekcji i promieniowania.

Opracowaną metodę zastosowano do wyznaczenia pól: pracy odkształcenia plastycznego, energii dyssypowanej w postaci ciepła oraz zdolności magazynowania energii podczas jednoosiowego rozciągania stali austenitycznej 310S. Procesy rozciągania przeprowadzono z różnymi prędkościami odkształcenia. Pokazano, że badana stal nie wykazuje istotnej wrażliwości na prędkość odkształcenia w rozważanym zakresie. Jednakże, wpływ czasu trwania procesu rozciągania na pole temperatury i poszczególne człony w równaniu przewodzenia ciepła był znaczący. Dla najszybszego z badanych procesów dominował człon związany z wzrostem temperatury próbki w czasie, a dla najwolniejszego – człon związany

z przewodzeniem ciepła w próbce. Wyznaczono także zależności poszczególnych źródeł ciepła, tj. energii dyssypowanej w postaci ciepła, ciepła przekazanego przez próbkę do otoczenia na skutek konwekcji i promieniowania oraz ciepła efektu piezokalorycznego od czasu procesu deformacji. Pokazano, że czas trwania procesu wpływał znacząco na wymianę ciepła na drodze konwekcji. Udział ciepła odbieranego od próbki w jej wyniku był największy podczas najwolniejszego z badanych procesów. Z kolei wpływ promieniowania w badanym zakresie temperatury był znikomy.

W niniejszej pracy potwierdzono, że zdolność magazynowania energii nie jest stała podczas deformacji plastycznej. W zaawansowanym stadium deformacji, wartości Z w obszarze lokalizacji odkształcenia plastycznego gwałtownie spadają i stają się bliskie zeru, a nawet ujemne, co oznacza, że materiał traci zdolność magazynowania energii. Uzyskane wyniki są spójne z wynikami innych prac. Jednakże, w rozprawie wyznaczono, w całym zakresie deformacji plastycznej, powierzchniowe rozkłady zdolności magazynowania energii Z , co nie było do tej pory obecne w literaturze.

Ponadto, wyznaczono zmianę lokalnej orientacji krystalograficznej podczas jednoosiowego rozciągania badanej stali, za pomocą metody dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (*Electron Backscatter Diffraction* EBSD). Zaobserwowano, że podczas deformacji, w wyniku znacznych obrotów sieci krystalicznej nastąpił rozwój tekstury krystalograficznej w kierunku dwóch głównych składowych. Zgodnie z oczekiwaniem, dla materiału o średniej wartości energii błędu ułożenia EBU, bliźniakowanie mechaniczne było, obok poślizgu dyslokacji, istotnym mikroskopowym mechanizmem odkształcenia plastycznego stali 310S. Zaobserwowano, że początkowa orientacja poszczególnych ziaren miała istotny wpływ na to, który z mechanizmów odkształcenia plastycznego dominował w danym ziarnie. Ponadto, pokazano, że na zaawansowanym etapie deformacji, dochodzi do fragmentacji ziaren zarówno na skutek poślizgu dyslokacji, jak i bliźniakowania. Bliźniaki oddziałują z innymi elementami mikrostruktury, co prowadzi do osiągnięcia finalnej tekstury krystalograficznej. W obszarze, w którym zdolność magazynowania energii jest ujemna, zaobserwowano bardzo drobną strukturę lamelową, złożoną z naprzemiennych warstw bliźniak-osnowa. Na podstawie licznych obserwacji mikrostruktury i rozważań teoretycznych obecnych w literaturze, stwierdzono, że struktura lamelowa występująca w całym obszarze, w którym $Z \leq 0$, stwarza dogodne warunki do propagacji zarówno mikropasm, jak i makroskopowych pasm ścinania. Jednakże, potwierdzenie obecności pasm ścinania oraz mogącego zachodzić w ich otoczeniu mechanizmu rekrytalizacji dynamicznej, której makroskopową manifestacją jest uwalnianie części energii magazynowanej w materiale, wymaga dalszych badań.

Sandra Mun'ia

Abstract

The PhD thesis concerns the analysis of the energy conversion process during deformation of polycrystalline materials. During plastic deformation a part of the mechanical energy delivered to the material is stored, increasing its internal energy, while the rest is dissipated as heat. The energy storage rate, defined as the ratio between the stored energy increment and the plastic work increment, is a measure of the energy conversion at a given moment of the deformation process.

In the thesis an experimental method for determining the distributions of energy balance components, namely plastic work and energy dissipated as heat, throughout the entire range of elastic-plastic deformation, was developed. The method is based on the displacement and temperature fields measured using digital image correlation (DIC) and infrared thermography (IRT) techniques and the elements of both the heat transfer theory and the theory of plasticity. Although primarily experimental in nature, the thesis also includes several computational aspects concerning the determination of both the stress and heat sources fields. The experimentally determined evolution of the displacement gradient field was used as input data for the elastic-plastic material model. Using the model, the fields of the stress and the plastic strain and, consequently, the plastic work were obtained. On the other hand, the energy dissipated as heat was determined based on the transient heat conduction equation, taking into account both the heat flow within the sample and the heat exchange between the sample and the surroundings. Using the measured evolution of temperature field, the distribution of the power of heat sources was directly determined from this equation. To obtain the heat sources in the material description (in the coordinate system, in which the displacement field was determined), and therefore to express the energy balance components in the same coordinate system, a multi-step computational procedure was developed. In the considered deformation process, the energy dissipated as heat is the dominant but not the only component of the heat sources. Therefore, the other components, namely the heat of the thermoelastic effect and the heat lost to the environment by convection and radiation were also taken into account.

The developed method was applied to determine the fields of plastic work, energy dissipated as heat, and energy storage rate during uniaxial tension of austenitic steel 310S. The uniaxial tension was performed with different strain rates. It was shown that the tested steel does not exhibit a significant sensitivity to the strain rate in the considered range. However, the influence of the process duration on the temperature field and the particular terms of the heat conduction equation was significant. For the highest considered strain rate, the term associated with the increase of the sample's temperature was dominant, whereas for the lowest one, the term connected to the heat conduction in the sample was of a major importance. The evolutions of particular components of the heat sources, including the energy dissipated as heat, the heat lost by the sample to the environment due to convection and radiation, and the heat of the thermoelastic effect were also determined. Process duration was found to have significant effect

on the heat exchange due to convection, with the highest contribution observed for the slowest tested process. Heat radiation, on the other hand, had an insignificant influence within the considered temperature range and could be omitted.

The obtained results confirmed that the energy storage rate Z is not constant throughout the plastic deformation process. At an advanced stage of the process, the Z values decrease rapidly in the area of the plastic strain localization, approaching zero or even becoming negative, indicating a loss of the material's ability to store energy. These findings are consistent with former research known from the literature, however, the thesis presents the determination of the energy storage rate Z distributions, which have not been previously reported in the literature.

Furthermore, the evolution of local crystallographic orientation during uniaxial tension of the 310S steel was determined using the Electron Backscatter Diffraction (EBSD) method. It was observed that due to significant rotations of the crystal lattice during deformation, the crystallographic texture developed towards two main texture components. As expected, for a material with an average stacking fault energy value, both the mechanical twinning and the dislocation slip played important roles as microscopic mechanisms of plastic deformation. The initial orientation of particular grains determined which of the plastic deformation mechanisms dominated in a given grain. Additionally, the presence of both dislocation slip and twinning, led to the grain fragmentation at an advanced stage of the deformation process. The twins interacted with other microstructure elements, contributing to the development of the final crystallographic texture. In the region where the energy storage rate is negative, a very fine lamellar structure composed of alternating twin-matrix layers was observed. On the basis of numerous microstructure observations and theoretical considerations present in the literature, it was found that the lamellar structure occurring in the entire area where $Z \leq 0$ creates favorable conditions for the propagation of both micro- and macro-shear bands. However, further research is required to confirm the presence of shear bands and the possible associated dynamic recrystallisation mechanism which is macroscopically manifested by the release of a part of the energy stored in the material.

Sandra Maior

