

Krystalograficzne aspekty formowania się pasm ścinania w metalach odkształcanych w zakresie dużych i ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia

mgr inż. Izabela Mania

Streszczenie

Formowanie się pasm ścinania (PS) w zakresie dużych i ultra-dużych prędkości odkształcenia nadal stanowi silnie nierozpoznane zagadnienie. Dotyczy to zwłaszcza krystalograficznych uwarunkowań procesu zarodkowania i propagacji pasm oraz roli, jaką odgrywa duża szybkość odkształcenia w zmianach strukturalnych i teksturowych. Stąd też dokładne rozpoznanie natury PS rozwijających się w zakresie dużych prędkości odkształcenia jest kluczowe dla prawidłowego zaprojektowania i przeprowadzenia procesów formowania oraz dla zabezpieczenia materiału przed penetracją pocisku w procesie udarowego niszczenia materiału.

W niniejszym programie badawczym analizowano mechanizmy odpowiedzialne za inicjację i propagację pasm ścinania pojawiających się podczas odkształcenia w zakresie dużych i ultra-dużych prędkości odkształcenia w próbkach mono- i poli- krystalicznych. Pierwsza grupa analiz skupiała się na zagadnieniu formowania się bliźniaków odkształcenia i pasm ścinania w oparciu o badania prowadzone na monokryształach metali o sieci RSC o zróżnicowanych wartościach γ_{EBU} (małej: stop Cu-14%wt.Al, średniej: Cu oraz dużej: Al) i o zróżnicowanych orientacjach krystalograficznych - sprzyjających formowaniu się pasm ścinania - $C\{112\}<111>$ oraz $S\{123\}<634>$. Analizy te uzupełniono o badania krystalitów wykazujących stabilne zachowanie podczas odkształcenia w matrycy kanalikowej w zakresie 'konwencjonalnych' prędkości, tj. o orientacji $Br\{110\}<112>$ i $G\{110\}<001>$. Monokryształy odkształcano w ściśle zdefiniowanych warunkach płaskiego stanu odkształcenia (PSC) z wykorzystaniem energii wybuchu, przy prędkości odkształcenia $\sim 10^5$ s⁻¹. Analiza ta pozwoliła na rozpoznanie krystalograficznych uwarunkowań procesu 'zarodkowania' PS i czynników sprzyjających ich propagacji w zakresie ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia.

Druga grupa analiz miała na celu wyjaśnienie mechanizmu odpowiedzialnego za propagację poślizgu poprzez granice ziaren (w procesie formowania się PS) w oparciu o badania na próbkach polikrystalicznych, metali o zróżnicowanej strukturze i γ EBU, tj. Al (stop AA1050), Cu (M1E) oraz stop CuZn30. Badania prowadzono na, tzw. próbkach 'kapeluszowych' (ang. hat-shaped samples), których proces odkształcenia przy użyciu młota opadowego pozwala symulować zjawisko penetracji pocisku poprzez strukturę metalu. Wyjaśnienie powyższych zagadnień opierało się głównie na pomiarach orientacji krystalograficznych w szerokim zakresie skali - od makro- (RTG), poprzez mikro/mezo-(SEM/EBSD) po nano-skalowe obserwacje z wykorzystaniem technik TEM.

Badania na monokryształach wykazały silną niestabilność strukturalną i teksturową wszystkich orientacji podczas odkształcania w matrycy kanalikowej przy ekstremalnie dużych prędkościach odkształcania. Ta niestabilność związana jest z intensywnym bliźniakowaniem odkształceniowym, a także formowaniem się pasm odkształcenia i pasm ścinania. Wykazano, że mechanizm formowania się pasma ścinania związany jest z utratą stabilności warstwowej struktury osnowa-bliźniak, która prowadzi do pojawienia się pasm ugięcia, jako prekursorów PS. Wykazano, że mechanizm oparty na rotacji sieci krystalicznej stowarzyszony z bliźniakowaniem w zre-orientowanej osnowie prowadzi do dominacji w obrazie tekstury składowych z najbliższego sąsiedztwa orientacji G. W efekcie tej rotacji, płaszczyzny typu $\{111\}$ sytuują się równoległe do płaszczyzny ścinania.

W przypadku agregatów polikrystalicznych wykazano, że mechanizm formowania się PS kontrolują mechanizmy analogiczne do tych obserwowanych w monokryształach. Niezależnie od początkowej struktury i γ EBU, formowanie się PS zachodzi poprzez ugięcie w obszarze lokalizacji spłaszczonych ziaren. We wszystkich ziarnach w obszarze ścinania sieć krystaliczna ulega rotacji w taki sposób, że jedna z płaszczyzn typu $\{111\}$ stała się równoległa do płaszczyzny ścinania, a kierunek $\langle 011 \rangle$ lub $\langle 112 \rangle$ usytuowany jest równoległe do kierunku ścinania.

Abstract

The formation of shear bands in the range of high and ultra-high strain rates is an important yet not fully recognized issue. Especially, in terms of crystallographic determination of the nucleation and propagation of shear bands in metallic materials and the influence of high strain

rate on structural and textural changes. Hence, an accurate description of SB nature, which are formed during high strain rate processes is crucial for purpose of design and implementation of forming processes but also in terms of materials protection against projectile penetration.

In the following research program the mechanisms responsible for the initiation and propagation of shear bands formed in single crystals and polycrystalline aggregates deformed at high strain rates were analyzed. The first group of analyses focused on the aspects related to the deformation twinning and shear banding in single crystal of fcc metals with different γ SFE values (low: Cu14%wt.Al alloy, medium: Cu, and high: Al) and with different initial crystallographic orientations - favoring the formation of shear bands, - C{112}<111> and S{123}<634>. These analyzes were supplemented with investigations on crystals which exhibits homogenous deformation behavior during 'conventional' strain rate deformation, i.e. Brass{110}<112> and Goss{110}<001>. Single crystals were deformed in plane strain compression (PSC) using explosive energy, at strain rate of $\sim 10^5 \text{ s}^{-1}$. This part enabled to identify the crystallographic conditions for SB 'nucleation' and propagation of SB during deformation at high strain rates.

The second group of analyses aimed to describe the mechanism responsible for the slip propagation across the grain boundaries (in the process of SB formation). Investigations were carried out on polycrystalline samples characterized by different initial structure and different γ SFE: high Al (AA1050 alloy), medium - Cu (M1E) and low- CuZn30 alloy. In the research, specimens with 'hat-shaped' geometry (which simulate the projectile penetration process through the metal structure) were deformed with the use of drop hammer. The present work was mainly based on the measurement of crystallographic orientations in a wide range of scales - from macro- (X-ray), through micro/meso- (SEM/EBSD) to nano- scales (TEM).

Detailed analysis showed that all studied single crystals exhibited structural and textural instability during deformation at extremely high strain rates which is associated with intense mechanical twinning, as well as, with the formation of deformation and shear bands. It was shown that mechanism the formation of shear band is strongly associated with the the loss of the stability of layered twin-matrix structure. Mechanism based on rigid body rotation associated with the twinning in re-oriented matrix leads to the dominance of G-oriented texture component. In result {111}-type planes situate parallel to the shear plane.

Studies on polycrystal aggregates shown that mechanism of SB formation is analogical to the one observed in single crystals. Regardless of the initial structure and γ SFE, the formation of shear bands occurs by deflection of flattened grains in narrow areas. In all grains within the shear region the crystal lattice rotated in such a way that one of the {111} type planes became

parallel to the shear plane, and the $\langle 011 \rangle$ direction became parallel to the shear direction.

[Recenzja: dr hab. inż. Magdalena Jabłońska, prof. PŚ](#)

[Recenzja: Prof. dr hab. inż. Małgorzata Lewandowska](#)

[Recenzja: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wierzbowski](#)