

Evaluation of stored energy due to plastic deformation as a function of crystallographic orientation

B. BACROIX^a, Th. CHAUVEAU^b

a. CNRS UPR3407, LSPM, Université Paris 13, 99 av. J.B Clément, F-93430 Villetaneuse, France, brigitte.bacroix@lsmc.cnrs.fr

b. Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, LSPM, CNRS UPR3407, F-93430, Villetaneuse, France, thierry.chauveau@univ-paris13.fr

Résumé:

Il est maintenant bien établi que l'énergie stockée (ES) lors de la déformation plastique due à l'accroissement et à la structuration des dislocations joue un rôle majeur sur l'initiation des mécanismes de germination et de croissance de grains lors des processus classiques de recristallisation discontinue ou continue observés lors de la mise en forme des métaux [1]. Ceci est vrai également pour le mécanisme particulier de migration de joints induite par la déformation (SIBM) qui peut jouer un rôle significatif dans la formation des textures spécifiques comme celles développées dans les aciers pour applications électriques (alliages Fe – Si)[2]. Cependant, il est également reconnu qu'un seul paramètre ne suffit pas pour rendre compte de tous les mécanismes de germination et de croissance qui peuvent se produire simultanément dans un même échantillon et pour expliquer clairement le lien entre les états déformés, recristallisés et les propriétés mécaniques finales. Alors que l'énergie stockée est encore très souvent liée à un seul paramètre, par exemple une seule densité de dislocations, il a été démontré qu'elle dépendait en fait de la façon dont s'organisaient ces dislocations. En outre, si cette énergie stockée agit comme une force motrice pour la migration des joints de grains, cette migration dépend également de la mobilité des interfaces mobiles ainsi que de la distribution de la taille et de la forme des grains, qui sont à leur tour affectées par la distribution des orientations et des désorientations caractérisant l'état déformé.

Des travaux antérieurs réalisés principalement sur Cu [3] et Fe [4] ont établi un lien clair entre ES et recristallisation et ont conduit à la conclusion que (i) dans l'état déformé, les zones associées à une valeur élevée de cette énergie stockée disparaissaient toujours en premier et (ii) un fort gradient d'ES était nécessaire à la croissance de germes et à la poursuite de la recristallisation. Ces deux conditions se retrouvent également dans les simulations d'évolution des textures de recristallisation, pour lesquelles une valeur seuil de gradient d'ES nécessaire à l'initiation de la migration de joints de grains et en général fixée arbitrairement afin de reproduire les évolutions expérimentales. Cependant, même s'il est possible de reproduire l'évolution des textures de recuit à partir de ces simulations, il est encore impossible d'être prédictif, car l'évolution de la texture et de la microstructure pendant le recuit peut dépendre de détails très locaux de la microstructure, comme des hétérogénéités locales d'état d'écrouissage ou d'orientation cristalline qui peuvent être difficiles à caractériser.

Le présent travail rappelle d'abord brièvement les différentes méthodes utilisées pour évaluer l'énergie stockée et les illustre à l'aide de données obtenues dans divers alliages métalliques. Il

présentera ensuite des données plus récentes obtenues principalement dans le cuivre [5] à l'aide d'un équipement de diffraction des rayons X de laboratoire qui démontrera, par comparaison avec des simulations effectuées avec des lois de plasticité cristalline à base de densités de dislocations que la diffraction permet d'obtenir des données complémentaires à celles obtenues par microscopie électronique à balayage, souvent privilégiées en raison de leur utilisation plus facile.

Abstract:

It is now well established that the stored energy (SE) during plastic deformation due to storage and organization of dislocations plays a significant role in both nucleation and growth steps of the classical discontinuous or continuous recrystallization process observed in metal forming [1], including Strain Induced Boundary Migration (SIBM) which can play a significant role in the formation of specific textures like those developed for the electrical steels [2]. However, it is also recognized that one single parameter is not enough to account for the various nucleation and growth mechanisms which can simultaneously occur within a single sample and to clearly explain the link between deformed, recrystallized states and final mechanical properties. Although SE is still often related to one single dislocation density parameter, it has also been shown that it may also depend on details of the dislocation structure that forms, with any long-range dislocation stress field playing a significant role. Furthermore, even if SE is a driving force for grain boundary migration, this migration also depends on the mobility of the moving interfaces as well as the grain size and shape distributions, which are in turn affected by the distribution of orientations and misorientations within the deformed state.

Some previous works mainly performed on Cu [3] and Fe [4] have established a clear link between SE and recrystallization and have led to the conclusions that (i) the zones within the deformed sample associated with a high value of this stored energy always disappear first and (ii) a strong SE gradient (ΔE) is necessary for the growth of a nucleus and the achievement of the recrystallization process. This is generally also assumed for the simulation of texture evolution during annealing, for which a ΔE threshold value for the initiation of boundary migration is arbitrarily set in order to reproduce the experimental evolutions. However, even if it is possible to reproduce annealing textures, it is still impossible to be predictive, since the evolution of texture and microstructure during annealing may depend on very local details within the microstructure, such as local heterogeneities of hardening state or grain orientations, which are hard to be completely captured experimentally.

The present paper will first briefly recall the various methods used for evaluating stored energy and illustrate them by data obtained in various metallic alloys. It will then present some more recent data obtained mainly in copper [5] using a laboratory X-Ray diffraction (XRD) equipment which will demonstrate, through a comparison with simulations performed with dislocation –based hardening laws, that XRD allows to get data which are complementary from those obtained through scanning electron microscopy, often preferred because of their greater facility of use.

Mots clefs : Recristallisation, Energie Stockée, Densités de dislocations, Diffraction des Rayons X.

- [1] J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena (Second Edition), Elsevier, Oxford, 2004
- [2] F. Gregori, K. Murakami, B. Bacroix, The influence of microstructural features of individual grains on texture formation by strain-induced boundary migration in non-oriented electrical steels. *Journal of Materials Science* 49 (2014) 1764-1775.
- [3] P. Gerber, J. Tarasiuk, T. Chauveau, B. Bacroix, A quantitative analysis of the evolution of texture and stored energy during annealing of cold rolled copper. *Acta Materialia* 51 (2003) 6359-6371.
- [4] A. Wauthier-Monnin, T. Chauveau, O. Castelnau, H. Réglé, B. Bacroix, The evolution with strain of the stored energy in different texture components of cold-rolled IF steel revealed by high resolution X-ray diffraction. *Materials Characterization* 104 (2015) 31-41.
- [5] B. Bacroix, S. Queyreau, D. Chaubet, E. Siv, T. Chauveau, B., The influence of the cube component on the mechanical behaviour of copper polycrystalline samples in tension. *Acta Materialia* 160 (2018) 121-136.