



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Etudes micromécaniques et statistiques du maclage dans les métaux hexagonaux : application au magnésium et zirconium

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le mardi 15 décembre 2015 dans l'amphithéâtre
Poncelet du bâtiment UFR MIM pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

Spécialité : Mécanique des Matériaux

Par

Pierre-Alexandre Juan

Composition du jury

Directeur de thèse : Stéphane Berbenni, Directeur de Recherche CNRS, LEM3,
Université de Lorraine

Codirecteur de thèse : Laurent Capolungo, Professeur, Georgia Institute of Technology

Rapporteurs : Teresa María Pérez Prado, Directrice de Recherche, IMDEA
Materials
Laurent Delannay, Professeur, Université Catholique de Louvain

Examineurs : Edgar Rauch, Directeur de Recherche CNRS, SIMAP, Université
de Grenoble
Lazslo Toth, Professeur, LEM3, Université de Lorraine

RÉSUMÉ

Le principal objectif de ce travail est l'investigation et la quantification de l'influence des interactions parent-macle et macle-macle sur la réponse mécanique des métaux hexagonaux Mg et Zr.

Une nouvelle approche à champs moyens est tout d'abord proposée pour étudier l'interaction parent-macle. Cette dernière est déclinée en deux modèles micromécaniques à base de doubles inclusions : un premier modèle généralisant le résultat de Tanaka-Mori aux milieux élastiques hétérogènes avec déformations libres de maclage appliqué à Mg pour du maclage primaire et secondaire, et un second modèle consistant à une extension du premier modèle à un milieu élasto-plastique incrémental appliqué, quant à lui, à des polycristaux d'alliage de Mg subissant un maclage primaire important. Leurs résultats mettent notamment en valeur l'influence des interactions de type parent-macle sur l'évolution des contraintes internes ainsi que l'activation des différents modes de déformation plastique : glissements et maclage.

L'influence des interactions macle-macle sur les phénomènes de nucléation et de croissance de macles est ensuite étudiée de façon statistique à partir de données EBSD extraites à partir d'un logiciel développé à cet effet dans le cadre de la thèse. Basé sur la théorie des graphes, celui-ci est capable de reconnaître n'importe quel type de macles. La première étude réalisée sur Zr montre que les interactions macle-macle sont défavorables à la nucléation de nouvelles macles et que les mécanismes de croissance peuvent différer de façon conséquente d'un mode de maclage à l'autre. Une seconde étude, effectuée à partir d'échantillons d'alliage de Mg (AZ31), discute des macles d'extension primaires de type $\{10-12\}$ à faible facteur de Schmid ainsi que des doubles macles $\{10-12\}$ - $\{10-12\}$. Pour ces dernières, le premier modèle micromécanique à double inclusion précité est appliqué et discuté par rapport aux résultats statistiques expérimentaux.

MOTS-CLES : maclage, magnésium, zirconium, jonctions macle-macle, micromécanique, EBSD

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to investigate and quantify the influence of parent-twin and twin-twin interactions on the mechanical response of hexagonal close-packed metals. To study parent-twin interactions, a mean-field continuum mechanics approach has been developed based on a new twinning topology in which twins are embedded in twinned grains. A first model generalizing the Tanaka-Mori scheme to heterogeneous elastic media is applied to first and second generation twinning in magnesium. In the case of first generation twinning, the model is capable of reproducing the trends in the development of backstresses within the twin domain as observed experimentally. Applying the methodology to the case of second-generation twinning allows the identification, in exact agreement with experimental observations, of the most likely second-generation twin variants to grow in a primary twin domain. Because the elastic behavior assumption causes internal stress level magnitudes to be excessively high, the first model is extended to the case of elasto-plasticity. Using a self-consistent approximation, the model, referred to as the double inclusion elasto-plastic self-consistent (DI-EPSC) scheme, is applied to Mg alloy polycrystals. The comparison of results obtained from the DI-EPSC and EPSC schemes reveals that deformation system activities and plastic strain distributions within twins drastically depend on the interaction with parent domains.

The influence of twin-twin interactions on nucleation and growth of twins is being statistically studied from zirconium and magnesium electron back-scattered diffraction scans. A new twin recognition software relying on graph theory analysis has been developed to extract all microstructural and crystallographical data. It is capable of identifying all twinning modes and all twin-twin interaction types occurring in hexagonal close-packed materials. The first results obtained from high purity Zr electron back-scattered diffraction maps reveal that twin-twin interactions hinder subsequent twin nucleation. They also show that mechanisms involved in twin growth may differ significantly for each twinning mode. A second study performed on AZ31 Mg presents statistics about low Schmid factor $\{10\bar{1}2\}$ tensile twins and about $\{10\bar{1}2\}$ - $\{10\bar{1}2\}$ sequential double twins coupled with a simplified version of the Tanaka-Mori scheme generalized to heterogeneous elasticity with plastic incompatibilities.

KEYWORDS : twinning, magnesium, zirconium, twin-twin junctions, micromechanics, EBSD.