

Soutenance de thèse

Développement et application d'une méthode à haute résolution angulaire pour la mesure des gradients d'orientation et des déformations élastiques par microscopie électronique à balayage

Clément ERNOULD

Mardi 15 décembre 2020, 9h00

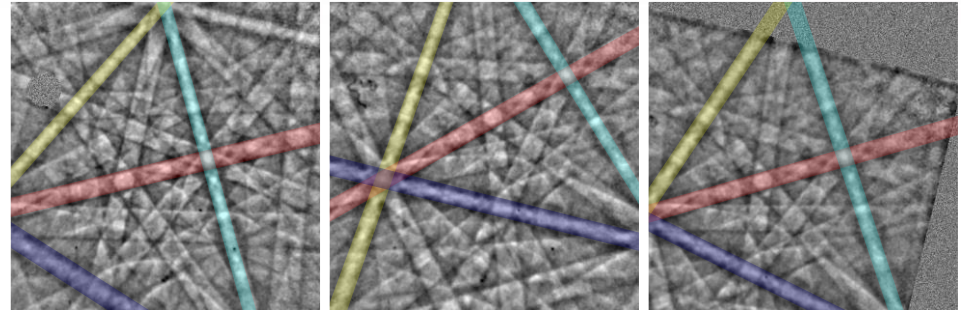
Membres du jury :

Laurent CAPOLUNGO	Ph.D, Los Alamos National Laboratory	Rapporteur
Stéphane ROUX	Chargée de Recherche CNRS, Université Paris-Saclay	Rapporteur
Claire MAURICE	Professeur, Mines Saint-Etienne	Examinatrice
Muriel VERON	Professeure, Université Grenoble Alpes	Examinatrice
Stefan ZAEFERER	Ph.D., Max-Planck Institut für Eisenforschung	Examineur
Emmanuel BOUZY	Professeur, Université de Lorraine	Directeur de thèse
Vincent TAUPIN	Chargé de recherche CNRS, Université de Lorraine	Co-directeur de thèse
Benoît BEAUSIR	Maître de Conférence, Université de Lorraine	Co-directeur de thèse

An original digital image correlation approach for the registration of EBSD or TKD patterns



Microstructure characterization with high-angular resolution ($\sim 0.01^\circ$)

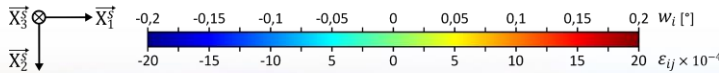
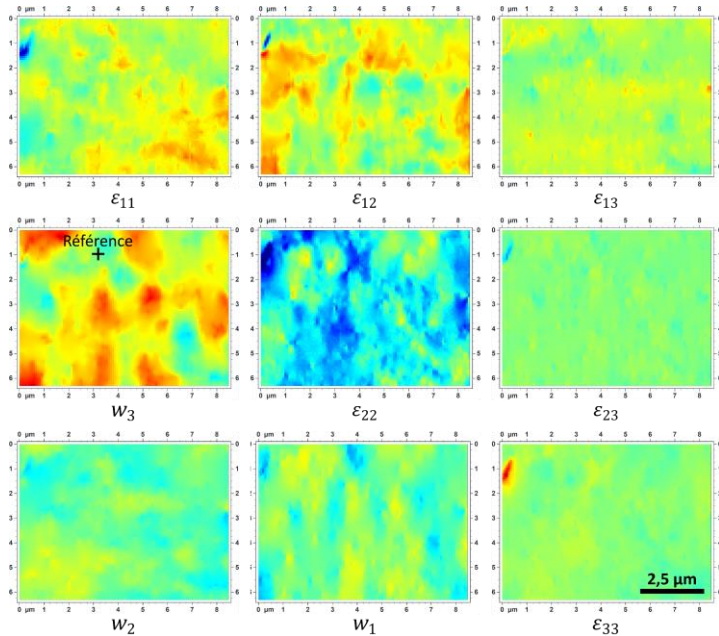


Reference pattern

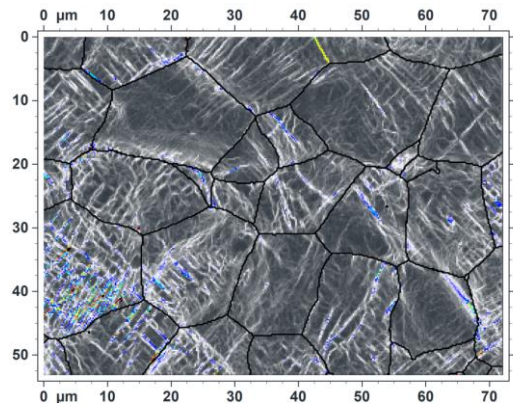
Target pattern

Registered target

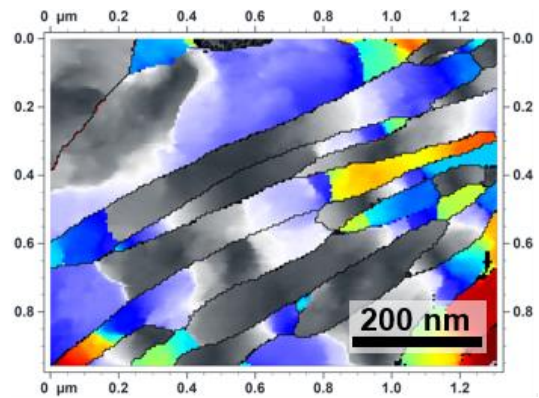
Elastic strain mappings



GND densities



Grain internal disorientation



Nanoscale in the SEM

Applications to deformed metals & semiconductors

Résumé

Développement et application d'une méthode à haute résolution angulaire pour la mesure des gradients d'orientation et des déformations élastiques par microscopie électronique à balayage

La compréhension des mécanismes de déformation dans les matériaux cristallins passe par la caractérisation fine des microstructures. Dans le cadre de la microscopie électronique à balayage, la mesure précise des gradients d'orientation et des déformations élastiques du cristal est l'objectif des méthodes dites à haute résolution angulaire. Pour cela, elles emploient des techniques de corrélation d'images numériques afin de recalibrer les clichés de diffraction électronique.

Cette thèse propose une méthode de recalage originale. Le champ de déplacement à l'échelle du scintillateur est décrit par une homographie linéaire. Il s'agit d'une transformation géométrique largement utilisée en vision par ordinateur pour modéliser les projections. L'homographie entre deux clichés est mesurée à partir d'une grande et unique région d'intérêt en utilisant un algorithme de Gauss-Newton par composition inverse numériquement efficace. Une correction des distorsions optiques causées par les lentilles de la caméra lui est intégrée et sa convergence est assurée par un pré-recalage des clichés reposant sur des algorithmes de corrélation croisée globale.

La méthode est d'abord validée numériquement à partir des clichés simulés distordus optiquement, désorientés jusqu'à 14° et présentant des déformations élastiques équivalentes jusqu'à 5×10^{-2} . La méthode est ensuite appliquée à des métaux polycristallins déformés plastiquement ainsi que des semi-conducteurs en utilisant la technique de diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) ou la nouvelle configuration TKD on-axis (transmission Kikuchi diffraction). Les structures de déformation sont analysées, en particulier dans de l'aluminium nanostructuré obtenu par déformation plastique sévère grâce au couplage de la méthode de recalage et de la configuration TKD on-axis. Ce couplage permet d'atteindre simultanément une haute résolution spatiale (3 nm) et une haute résolution angulaire ($0,01^\circ$).

Mots-clés : HR-EBSD ; HR-TKD ; TKD on-axis ; Corrélation d'images numériques (CIN) ; Densités de dislocations géométriquement nécessaires (GND) ; Microscopie électronique à balayage (MEB).

Abstract

Development and application of a high angular resolution method for the measurement of lattice rotations and elastic strains in the scanning electron microscope

Understanding the deformation mechanisms in crystalline materials requires a fine characterization of microstructures. The precise measurement of lattice rotations and elastic strains in the scanning electron microscope is the aim of the so-called high-angular resolution methods. For this purpose, digital image correlation techniques are used in order to register electron diffraction patterns.

In this thesis, an original registration approach is proposed. The displacement field across the whole scintillator is modelled by a linear homography. Such a shape function is often met in the field of computer vision to describe projective transformations. The homography between two patterns is measured from a single and large region of interest using a numerically efficient inverse-compositional Gauss-Newton algorithm. It integrates a correction of optical distortions caused by camera lenses and its convergence is ensured by a pre-alignment step of the patterns, which relies on global cross-correlation algorithms.

The proposed method is validated numerically from simulated and optically distorted patterns showing disorientations up to 14° in the presence of elastic strains up to 5×10^{-2} . The method is then applied to patterns acquired by means of electron backscatter diffraction (EBSD) or using the new on-axis transmission Kikuchi diffraction (TKD) configuration. Plastically deformed polycrystalline metals as well as semiconductors are characterized. In particular, the deformation structures in a nanostructured aluminium obtained by severe plastic deformation are finely observed by coupling the image registration method to the on-axis TKD configuration. This coupling allows a high spatial resolution (3 nm) and a high angular resolution (0.01°) to be reached simultaneously.

Keywords: HR-EBSD; HR-TKD; TKD on-axis; Digital Image Correlation (DIC); Geometrically necessary dislocation densities (GND); Scanning electron microscope (SEM).