

Intérêt des mesures de champs de désorientation sous indent pour quantifier des interactions entre systèmes de glissement d'un cristal CFC

Mots clés : plasticité cristalline, éléments finis, identifiabilité, nanoindentation, interaction, dislocations

Contexte :

Repousser les performances de composants industriels critiques (aéronautique, nucléaire) requiert l'utilisation de lois de comportement micromécanique décrivant de plus en plus finement les mécanismes de déformation des matériaux. En particulier, l'augmentation des moyens de calcul autorise aujourd'hui la simulation de structures en décrivant la plasticité à l'échelle cristalline dans le cadre de la mécanique des milieux continus. Cette description nécessite de prendre en compte les interactions entre les défauts des cristaux, ce qui requiert la connaissance de nombreux paramètres. En particulier, l'identification expérimentale des paramètres qui pilotent les interactions entre les systèmes de glissement d'un cristal est un verrou scientifique persistant dans la communauté « mécanique et matériaux » et un frein important à l'utilisation des modèles micromécanique dans la conception et le dimensionnement de composants industriels. L'analyse des topographies des empreintes Berkovich obtenues après essai de nanoindentation sur un cristal CFC est une voie très prometteuse pour lever ce verrou [1]. Les champs de désorientation induits par l'indentation sont également des informations potentiellement d'une grande richesse [2]. Étant donnée la complexité des lois de plasticité cristalline, des champs sous la pointe de l'indenteur et de la variété des observables offerts par la microscopie moderne, concevoir les expériences optimales pour bien poser le problème inverse d'identification des paramètres plastiques est une difficulté majeure.

Les progrès de la simulation numérique permettent de remplacer, compléter ou préparer la plupart des essais mécaniques réels par des essais virtuels. L'approche développée par l'équipe consiste à concevoir numériquement les expériences optimales d'indentation Berkovich sur des monocristaux en amont de l'utilisation d'une méthode FEMU (finite element model updating). Il s'agit notamment de rechercher numériquement les combinaisons d'orientations pointe/cristal et de plans de coupe FIB (focused Ion Beam) pour les observations HR EBSD (high resolution electron backscatter diffraction) [3] qui contiennent l'information pertinente pour l'identification des paramètres pilotant les interactions entre les systèmes de glissement. Cette recherche s'effectue en maximisant l'identifiabilité paramétrique a priori, c'est-à-dire avant le processus FEMU [4,5].

Objectifs :

L'objectif est de quantifier les interactions entre les systèmes de glissement de cristaux CFC d'intérêts (Ni,Cu) en utilisant la nanoindentation, les observables associés aux techniques de microscopie modernes (AFM, HR EBSD) et en restant dans le cadre de la mécanique des milieux continus et de la plasticité cristalline.

Méthode :

Le modèle CPFEM (crystal plasticity finite element model) de l'indentation élaboré par l'équipe permet de simuler les courbes de nanoindentation et les topographies résiduelles pour n'importe quel orientation pointe/cristal à l'aide d'une loi de plasticité de type Méric-Cailletaud [6]. La méthode d'identifiabilité développée quantifie a priori la stabilité de la solution d'un problème inverse à partir de la sensibilité des

observables aux paramètres plastiques du cristal. Le travail suivra le processus suivant :

- Introduire dans le modèle CPFEM de nouveaux observables, en particulier des champs de désorientation du cristal et des contraintes résiduelles et les confronter à quelques données expérimentales HR EBSD.
- Tester numériquement les potentialités de ces nouveaux observables en calculant l'identifiabilité des paramètres pilotant les interactions pour différentes orientations pointe/cristal et quelques matrices d'interaction potentielles. Comparer les résultats avec ceux déjà obtenus en utilisant des topographies [6].
- Cribler l'espace paramétrique des paramètres plastiques et des orientations pointe/cristal afin de construire une base de données des sensibilités des observables aux paramètres pour deux monocristaux : Ni et Cu.
- Analyser la complémentarité des observables (courbes Ph, topographies, désorientation, ...) de la base de données pour proposer des combinaisons d'expériences optimales de nanoindentation susceptibles de bien poser le problème inverse d'identification des paramètres.
- Résoudre le problème inverse par la méthode FEMU. Confronter les interactions obtenues par cette approche expérimentales aux valeurs obtenues par simulation DDD (discrete dislocation dynamics simulations) issues de la littérature.
- Enrichir de la loi de comportement pour prendre en compte l'hétérogénéité de la matière. L'identification des paramètres de longueurs caractéristiques introduits devra s'appuyer sur l'enrichissement de l'approche précédente.

- [1] E. Renner, Y. Gaillard, F. Richard, F. Amiot, P. Delobelle, Sensitivity of the residual topography to single crystal plasticity parameters in Berkovich nanoindentation on FCC nickel, *Int. J. Plast.* 77 (2016) 118–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.10.002>.
- [2] P. Juran, P.-J. Liotier, C. Maurice, F. Valiorgue, G. Kermouche, Investigation of indentation, impact and scratch-induced mechanically affected zones in a copper single crystal, *Comptes Rendus Mécanique*. 343 (2015) 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2015.03.003>.
- [3] S. Breumier, F. Richard, C. Maurice, A. Villani, G. Kermouche, M. Lévesque, Complementarity of impact shot displacements and induced residual stress fields for a reliable estimation of crystal viscoplasticity parameters, (2020). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03019130>, submitted to JTCAM (<https://jtcam.episciences.org>).
- [4] F. Richard, Vers une détermination guidée par l'identifiabilité du comportement mécanique des matériaux par nanoindentation, UBFC, HDR, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01590429>, 2017. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01590429>.
- [5] E. Renner, A. Bourceret, Y. Gaillard, F. Amiot, P. Delobelle, F. Richard, Identifiability of single crystal plasticity parameters from residual topographies in Berkovich nanoindentation on FCC nickel, *J. Mech. Phys. Solids*. (2020) 103916. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.103916>.
- [6] L. Méric, P. Poubanne, G. Cailletaud, Single Crystal Modeling for Structural Calculations: Part 1 - Model Presentation, *J. Eng. Mater. Technol.* 113 (1991) 162–170. <https://doi.org/10.1115/1.2903374>.

Financement et encadrement :

Le financement de cette thèse est assuré par le projet ANR PRC NOTIFICATION (ANR-22-CE08-0009), un projet collaboratif entre femto-st (Besançon) et le LGF (Saint-Etienne). Les travaux seront majoritairement réalisés au département mécanique appliquée de l'institut femto-st à Besançon.

Directeur de thèse : Fabrice RICHARD (femto-st), co-directeurs : Claire Maurice (LGF), Yves Gaillard (femto-st).

Profil et compétences recherchées :

Bon niveau de culture générale et scientifique. Bonnes capacités d'analyse, de synthèse et de communication.

Le candidat devra être titulaire d'un diplôme Bac+5 en mécanique ou physique des matériaux. Il devra avoir les compétences en mécanique des milieux continus et science des matériaux, et un goût prononcé pour les méthodes expérimentales et numériques. Il est souhaitable que le candidat ait de bonnes connaissances en méthodes numériques (formulation variationnelle, éléments finis, ...), en programmation (script Octave/Matlab ou Python) et maîtrise au moins un logiciel éléments finis (Ansys, ...).

Niveau de français requis: Intermédiaire supérieur: Vous pouvez utiliser la langue de manière efficace et vous exprimer précisément.

Niveau d'anglais requis : Intermédiaire. Vous pouvez parler la langue de manière compréhensible, cohérente et avec assurance sur des sujets de la vie courante qui vous sont familiers.

Pour postuler : Envoyer votre dossier à fabrice.richard@univ-fcomte.fr comportant :

- curriculum vitae détaillé
- copie de la carte d'identité ou passeport
- lettre de motivation/projet personnel
- relevés de notes L3, M1, M2
- 2 lettres de recommandation
- noms et les coordonnées d'au moins deux personnes pouvant être contactées pour recommandation