

Soutenance de thèse

Cesar Moises SANCHEZ CAMARGO soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'institut Clément Ader et intitulée «*Caractérisation mécanique multi-échelles des matériaux métalliques par nanoindentation*»

Le 26 avril 2019 à 10H30 à l'ISAE-SUPAERO Amphi 4

devant le jury composé de

Mme Catherine MABRU	Professeure ISAE-SUPAERO	Directrice de thèse
M. Anis HOR	Professeur Associé ISAE-SUPAERO	Co-directeur de thèse
Mme Salima BOUVIER	Professeure Université Compiègne	
M. Robert CAMILLE	Ingénieur de recherche Arts Métiers ParisTech	
M. Guillaume KERMOUCHE	Professeur Ecole des Mines Saint-Etienne	Rapporteur
M. Marc LEGROS	Directeur de recherche Centre élaboration de matériaux et d'études structurales	
M. Hervé PELLETIER	Professeur INSA Strasbourg	Rapporteur

Résumé :

Avec le développement des matériaux fonctionnels (multi-matériaux, multicouches,...), la caractérisation du comportement mécanique par des moyens macroscopiques conventionnels est devenue de plus en plus difficile. Ces méthodes conventionnelles sont donc substituées progressivement par des moyens de caractérisation multi-échelles. Parmi ces moyens, la nanoindentation, qui peut résoudre certains défis de la micro-caractérisation tels que la présence de phases indissociables, les systèmes multicouches, les revêtements ultra-minces, etc. Cet outil est devenu une technique de haute précision capable de solliciter des volumes de matière très faibles et fournir des informations riches pour la caractérisation des matériaux. Cependant, cet outil est utilisé majoritairement pour identifier les propriétés élastiques et qualitativement certains paramètres tels que la dureté, la ductilité et les contraintes internes. Ce travail de thèse s'intéresse à la caractérisation du comportement élastoplastique par nanoindentation à deux échelles : l'échelle macroscopique et l'échelle du cristal. Le premier défi de ce travail est expérimental. Il s'agit de générer des surfaces avec des propriétés représentatives de la microstructure étudiée. Ce défi est d'autant plus relevé que le matériau utilisé comme modèle est l'acier 316L très ductile et dont la surface est sensible au moindre changement. Un protocole expérimental a été mis en place, à l'issue de ce travail, et les erreurs et dispersions de la réponse en nanoindentation introduites par les différentes étapes de génération de surface ont été quantifiées. Une base de données étendue a été mise en place, par la suite. Différentes géométries d'indent ont été appliquées à plusieurs profondeurs. Cette base de données va alimenter des stratégies d'identification inverse basée sur un couplage entre des algorithmes d'optimisation et une modélisation éléments finis de l'essai. Deux types d'algorithmes ont été appliqués : Levenberg-Marquardt et l'algorithme génétique. Ce dernier est très consommateur en temps de calcul. Différents modèles EF axisymétrique et 3D ont été utilisés. Ces modèles ont été soigneusement optimisés par rapport au temps de calcul. Plusieurs stratégies d'identification ont été employées en se basant sur différentes données expérimentales issues de l'essai de nanoindentation telles que la courbe de charge-décharge, la forme de l'empreinte résiduelle et l'association de plusieurs géométries d'indent. Plusieurs modèles d'érouissage isotrope ont été identifiés. À l'échelle macroscopique, les modèles d'érouissage isotrope classiques ont été déterminés. À l'échelle du grain, la loi cristalline de Méric et Cailletaud a été identifiée. Les résultats obtenus ont été confrontés, à l'échelle macroscopique, à des identifications réalisées sur le même matériau à partir des essais de traction et de compression et ont montré que l'association de multiples géométries d'indentation permet de reproduire le comportement volumique du

316L avec une précision acceptable. Pour le comportement du cristal, des essais de compression de micropilliers ont été utilisés pour se procurer des données de référence à cette échelle. La comparaison montre beaucoup de dispersion dans les deux cas. En effet, certains phénomènes liés à la densité de dislocation très variables d'un grain à l'autre sont responsables de cette dispersion. Cette densité de dislocation n'est pas prise en compte, en tant que variable, dans le modèle cristallin utilisé. L'utilisation d'un modèle plus physique intégrant la densité de dislocation et son évolution permet d'améliorer ces résultats. Enfin, une nouvelle méthode d'identification a été proposée. Cette méthode est basée sur l'estimation et l'introduction de la géométrie réelle de l'indent dans le modèle EF utilisé pour l'identification. La méthode a été validée dans le cas de la pointe Berkovich et elle montre des résultats très prometteurs.

Mots-clés : nanoindentation, caractérisation multi-échelles, écrouissage, éléments finis

Summary:

The nanoindentation test was developed in the last 50 years, initially for the measure of the micro hardness. Later it was evolved for the measure of the elastic modulus of the materials. Recently it was demonstrated that the indentation curve can be used for the estimation of the elastoplastic behavior of metallic materials through the inverse methods. In this context, this Thesis proposes the development of a new method of characterization from several indenter tips, allowing the description of the macroscopic behavior of the metals.

Keywords: nanoindentation, multi-scale characterization, work-hardening, finite element