

Ecole doctorale Sciences Physiques et Mathématiques pour l'Ingénieur

Thèse

Présentée devant

L'Institut National des Sciences Appliquée (INSA) de Rouen

Pour obtenir

Le grade de Docteur

Spécialité : mécanique, génie mécanique

Par

Salem MEFTAH

Modélisation de la plasticité due à une transformation martensitique dans les aciers.

Soutenance le 26 Octobre 2007
Devant la commission d'examen

M. LEXCELLENT C.	Président	Professeur des Universités LMRC École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon.
Mme. GAUTIER E.	Rapporteur	Directeur de recherches CNRS LSG2M Ecole des Mines Nancy
M. BERGHEAU J.M.	Rapporteur	Professeur des Universités LTDS Ecole Nationale D'Ingénieurs Saint Etienne
M. GILLES Ph.	Examineur	Chercheur ARIVA Groupe Paris
M. CAILLETAUD G.	Examineur	Professeur des Universités Centre des matériaux d'Evry Ecole des Mines Paris
M. TALEB L.	Directeur de thèse	Professeur des Universités LMR INSA de Rouen
M. SIDOROFF F.	Co-directeur de thèse	Professeur des Universités LTDS Ecole Centrale de Lyon
M. BARBE F.	Co-directeur de thèse	Maître de conférences LMR INSA de Rouen

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes profonds remerciements à mes directeurs de thèse: Messieurs les professeurs des universités, Lakhdar TALEB de l'INSA de Rouen, et François SIDOROFF de l'Ecole Centrale de Lyon, pour m'avoir proposé ce sujet de thèse. Merci pour leurs précieux conseils scientifiques, pour la qualité de leurs encadrements ainsi que leur présence et leur disponibilité.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Fabrice Barbe, maître de conférences à l'INSA de Rouen (co-directeur de thèse) pour la qualité de son encadrement, pour tous ses encouragements, et surtout pour son aide sans limite. Je salue aussi son ouverture d'esprit et sa bonne humeur.

Je remercie madame Elisabeth GAUTIER, professeur à l'Ecole des Mines de Nancy, et monsieur BERGHEAU Jean-Michel, professeur à l'Ecole Centrale de Lyon, d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ce modeste travail de thèse. Mes remerciements s'adressent aussi au Président et aux Membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

J'aimerais remercier madame Elisabeth GAUTIER, professeur à l'Ecole des Mines de Nancy, et monsieur Georges CAILLETAUD, professeur à l'Ecole des Mines de Paris, pour les diverses discussions que j'ai pu avoir avec eux, pour avancer ce travail.

Je voudrais remercier tout le personnel du Laboratoire de Mécanique de Rouen et du Département de mécanique à l'INSA de Rouen, pour leur soutien durant mes travaux de thèse et mon poste d'ATER.

J'aimerais dire un grand merci à tous les thésards de notre laboratoire pour les différents moments de partage que nous avons eus.

Je remercie chaleureusement ma mère, mes sœurs et mes frères pour tout leur soutien et leur patience.

A la mémoire de mon
père.

Résumé

Abstract

Résumé

Ce travail porte sur l'analyse d'un phénomène particulièrement important dérivant des conséquences mécaniques des transformations de phases solide–solide : la plasticité de transformation ou TRIP (TRansformation Induced Plasticity) et son interaction avec la plasticité classique. Ce sujet est abordé à la fois par des investigations expérimentales et par une approche de modélisation numérique, pour les transformations martensitiques.

La modélisation est basée sur le calcul par éléments finis des interactions mécaniques entre plaquettes de martensite et sa phase parente dans un domaine 2D représentant un grain d'austénite. Une première étude paramétrique détaillée est réalisée, en simulant une transformation martensitique dans l'acier 16MND5. La progression de la transformation est assurée par la formation successive des variants, sélectionnés selon un critère thermodynamique. Plusieurs sont testés et analysés (force motrice mécanique, énergie de déformation, énergie potentielle) en tenant compte de l'effet des principaux facteurs influant sur le TRIP (effet des efforts externes, pré-écrouissage de la phase austénitique ...). Les résultats obtenus en terme de plasticité de transformation montrent que certaines configurations de cette approche (taille du maillage suffisamment grand, position et direction de cisaillement de la première plaquette bien définie, conditions aux limites, critères thermodynamiques...) permettent de représenter relativement bien l'évolution de la plasticité de transformation, surtout du point de vue qualitatif. Ceci est valable pour les essais de TRIP sous chargement durant la transformation, comme pour les essais d'interaction plasticité classique – TRIP, essais pour lesquels aucun modèle purement analytique ne s'est, à notre connaissance, montré prédictif. Afin d'améliorer ces résultats quantitativement, nous avons étendu la modélisation à l'échelle de plusieurs grains répartis périodiquement dans un domaine 2D (modèle multi-grains). Les premiers résultats sont encourageants, notamment par le fait que les simulations des essais de TRIP dans l'acier 35NCD16 montrent une nette amélioration de la cinétique de transformation et de l'allure de l'évolution du TRIP.

Expérimentalement, nous avons réalisé des essais classiques de TRIP pour une transformation martensitique dans l'acier 35NCD16, sous différents modes de chargement (mono-axial et bi-axial) pendant la transformation. Nous avons constaté que la direction de chargement (traction, torsion ou combinaison des deux) n'influe pas sur le TRIP équivalent dans la mesure où l'équivalent au sens de von Mises de la contrainte appliquée reste le même dans tous les essais. D'autres investigations expérimentales ont porté sur le phénomène d'interaction plasticité-TRIP mis en évidence dans les travaux de Taleb et Petit-Grostabussiat sur l'acier 16MND5. Ces nouvelles investigations, sur l'acier 35NCD16, ont permis de confirmer que le simple fait de pré-écrouir la phase austénitique pouvait conduire, sous chargement en contrainte nulle, à l'apparition d'une déformation permanente lors de la transformation, déformation apparentée à du TRIP. De même que pour l'acier 16MND5, ce TRIP dit d'interaction avec la plasticité de la phase parente apparaît dans la même direction et avec le même signe que le chargement ayant causé le pré-écrouissage.

Abstract

This work is concerned with the analysis of a particularly important phenomenon which corresponds to one of the mechanical consequences of solid-solid phase transformations: the transformation plasticity or TRIP (Transformation Induced Plasticity) and its interaction with classical plasticity. This subject is addressed from the point of view of experimental investigations as well as with a numerical modelling approach, concerning martensitic transformations.

The modelling is based on the finite elements computation of the mechanical interactions between martensite plates and its parent phase in a 2D domain representing a grain. A first detailed parametric study has been realised by simulating a martensitic transformation in a 16MND5 steel (French norm). The transformation progresses with the successive formation of variants selected according to a thermodynamical criterion. Several criteria have been tested and analysed (mechanical driving force, strain energy and potential energy), taking into account the effect of the main factors influencing the TRIP (external load, prehardening in the austenitic phase...). The results obtained in terms of transformation plasticity have shown that several interesting configurations of this approach (large enough mesh size, given position and shearing direction of first variant, boundary conditions, thermodynamical criteria...) allow to represent, with a reasonable discrepancy, the evolution of transformation plasticity, particularly from the qualitative point of view. This is valid for the TRIP tests performed with a load kept constant during transformation as well as for the tests dealing with the interaction plasticity-TRIP, tests for which there is, to our knowledge, no purely analytical model which proves to be predictive. In order to improve quantitatively these results, the modelling has been extended on the scale of several grains distributed periodically in a 2D domain (multigrain model). The first results are satisfying since the simulations dealing with 35NCD16 (French norm) have shown a significant improvement of the kinetics of transformation and of the evolution of transformation plasticity as regards to experimental observations.

Experimentally, classical TRIP tests have been performed with a 35NCD16 steel subjected to a martensitic transformation, with different cases of constant load (uni-axial and Bi-axial) applied during the transformation. It has been observed that the direction of loading does not have any influence on the equivalent TRIP, provided that von Mises equivalent loading stress is the same for all the tests. Other investigations concern the phenomenon of the interaction between plasticity and TRIP which has been evidenced in the work of Taleb and Petit-Grostabussiat on 16MND5 steel. These new investigations, on 35NCD16 steel, have permitted to confirm that the fact to pre-harden the austenitic phase could lead to an extra permanent strain, developing without any load during a transformation. This permanent strain is considered to be a TRIP due to the interaction with the plasticity of the parent phase. As for 16MND5 steel, it takes the same direction and sign as the external load which has caused pre-hardening.

Sommaire

Sommaire

Chapitre I : Etude Bibliographique

Introduction générale	11
I Introduction	17
II Notion de transformation de phases, transformation martensitique	17
III Plasticité de la transformation	20
III-1 Définition	20
III-2 Mécanismes responsables de la plasticité de transformation	23
III 2-1 Mécanisme de Greenwood et Johnson	23
III-2-2 Mécanisme de Magee	23
IV Principaux modèles simulant la plasticité de transformation et les transformations martensitiques	24
IV-1 Modèle de Leblond et sa version améliorée par Taleb et Sidoroff	27
V Interaction plasticité classique- plasticité de transformation	33
V-1 Travaux expérimentaux réalisés	33
-Dans le cas des transformations bainitiques	39
-Dans le cas des transformations Martensitiques	39
V-2 Modélisation du phénomène de l'interaction plasticité classique-TRIP	40
- Prévion du modèle de Leblond dans le cas d'une transformation bainitique	40
- Prévion du modèle de Leblond dans le cas d'une transformation martensitique	41
VI Modèles numériques simulant les transformations martensitiques en 2D	42
VI-1 Modèle de Ganghoffer et Simonsson	43
VI-2 Modèle de Wen	46
VI-3 Modèle de Idesman et al	48
VII Conclusion	49

Chapitre II: Modélisation à l'échelle mono-grain de la plasticité de transformation dans les transformations martensitiques

I Introduction	52
II Définition du modèle numérique	52
II-1 La géométrie du modèle	52
II-2 Critère d'avancement de la transformation	54
II-2-1 Force motrice mécanique maximale (Ganghoffer)	54
II-2-2 Force motrice mécanique moyenne (Wen)	54

II-3 Implémentation du modèle et hypothèses imposées sur la modélisation -----	55
III Etude paramétrique du modèle -----	58
III-1 Evaluation du modèle de Ganghoffer -----	58
III-2 Transformation élément par élément -----	59
III-3 Effet de la taille du maillage -----	61
III-4 Effet du choix de type d'éléments finis -----	63
III-5 Effet de la direction de cisaillement -----	64
III-6 Effet du critère de choix des plaquettes -----	65
III-7 Effet des conditions aux limites imposées sur les bords du maillage -----	66
IV Analyses et comparaisons entre les critères du choix des variants -----	70
IV-1 Critère de l'Energie de Déformation Elastique (EDE) -----	71
IV-1-1 Identification de la 1 ^{ère} plaquette par critère de la minimisation de l'EDE	72
IV-1-2 Arrangement structural des plaquettes sous le critère de l'EDE-----	75
IV-1-3 Résultats du TRIP obtenus par le modèle basé sur l'EDE -----	76
IV-2 Travail des efforts externes -----	78
IV-3 Critère de l'énergie potentielle élastique (EPE)-----	81
V Interaction plasticité classique - plasticité de transformation -----	83
VI Conclusion -----	86
 Chapitre III : Premières analyses expérimentales et évaluation des modèles numériques développés	
I Introduction -----	90
II Partie expérimentale -----	90
II-1 Programmes d'essais -----	90
II-2 Présentation du dispositif expérimental-----	91
II-2-1 Matériau et éprouvettes utilisés-----	91
II-2-2 Dispositif thermomécanique -----	92
II-2-3 Dispositif de mesure des déplacements -----	95
II-3 Essais de TRIP sous chargements uni-axiaux -----	95
II-3-1 Essai de dilatométrie libre -----	95
II-3-2 Essais de TRIP sous contraintes constantes -----	100
II-3-2-1 Essai de TRIP sous contrainte de traction -----	100
II-3-2-2 Essai de TRIP sous contrainte de cisaillement-----	103
II-4 Essais de TRIP sous chargement bi-axial -----	108
II-5 Analyses et comparaisons des résultats expérimentaux -----	110
II-6 Interaction plasticité classique - plasticité de transformation -----	113
II-7 Caractérisation de comportements mécanique des phases -----	115
II-7-1 Essai de caractérisation de la phase austénitique -----	116
II-7-2 Essai de caractérisation de la phase martensitique -----	116

III- simulation numérique du TRIP dans l'acier 35NCD16	117
III-1 Simulation à l'échelle mono-grain	117
III-2 Modélisation à l'échelle multi-grains	119
III-2-1 Présentation géométrique du modèle multi-grains	119
III-2-2 Analyse de l'arrangement structural des plaquettes dans le modèle multi-grains	124
III-2-2-1 Effet des efforts externes sur la distribution des plaquettes dans l Grains	124
III-2-2-2 Effet du voisinage des grains	126
III-3 Simulation du TRIP à l'échelle multi-grains	128
III-3-1 analyse des résultats pour les essais de TRIP classique	128
III-3-2 analyse des résultats pour les essais d'interaction plasticité classique – TRIP	131
IV Conclusion	132
Conclusion générale et perspectives	133
Références bibliographiques	138
Annexe	143