



HAL
open science

Simulation numérique des états d'endommagement du soudage de l'acier 15-5PH

Tong Wu, Philippe Gilles, Michel Coret, Alain Combescure

► **To cite this version:**

Tong Wu, Philippe Gilles, Michel Coret, Alain Combescure. Simulation numérique des états d'endommagement du soudage de l'acier 15-5PH. 8e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01695595

HAL Id: hal-01695595

<https://hal.science/hal-01695595>

Submitted on 29 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation numérique des états d'endommagement du soudage de l'acier 15-5PH

Tong Wu*, **Philippe Gilles****, **Michel Coret***, **Alain Combescure***

* *LaMCoS, INSA-Lyon, CNRS UMR5259, F69621, France*

tong.wu@insa-lyon.fr, michel.coret@insa-lyon.fr, alain.combescure@insa-lyon.fr

** *AREVA-NP, 92084 Paris La défense, France*

philippe.gilles@areva.com

RÉSUMÉ.

Ce travail concerne la modélisation de l'endommagement d'un matériau résultant d'une histoire complexe des déformations thermoviscoplastiques multiphasées subies par les zones soudées. Dans ce travail un modèle mésoscopique élast-ovisc-oplastique endommagé multiphasique est développé pour la transformation de phase. Les équations constitutives du modèle sont un couplage entre les dommages ductiles, déformations élasto-visco-plastique et transformation de phase. Le modèle emploie la méthode de localisation-homogénéisation pour simuler le comportement du mélange variable de phases pendant la transformation. L'article présente les paramètres de la transformation de phase ainsi que le modèle d'endommagement de l'acier 15-5PH, obtenus au LaMCoS. D'autre part, les modèles sont implantés dans le logiciel éléments fins CAST3M[®] du CEA.

ABSTRACT.

This study concerns the modelling of the damage of material induced by a complex history of thermoviscoplastic multiphase in heat-affected-zone(HAZ) of welding. In this work, a mesoscopic mode of elastoplastic damaged multiphase is developed for the transformation of phase. The constitutive equations of the model are a coupling between the ductile damage, elaviscoplastic deformations and transformation of phase. The model employs the method of localization-homogenisation for simulate behaviors of the phases' variables during transformation. The article presents the parameters of phase transformation and the damage model of the metal 15-5PH, which gauged in LaMCoS of INSA de LYON. Moreover, the models are implemented in the elements fine software CAST3M[®] of CEA.

MOTS-CLÉS :

Endommagement, soudage, transformation de phase, simulation numérique

KEYWORDS:

Damage, welding, phase transformation, numerical simulation

1. Introduction

Récemment beaucoup d'efforts ont été consacrés au développement de modèles numériques pour prédire les contraintes résiduelles induites par le procédé de soudage. Via l'homogénéisation des propriétés des matériaux, quelques modèles macroscopiques sont appliqués pour la simulation des contraintes résiduelles du soudage des matériaux à transformation de phases. De plus, certaines simulations tiennent compte du changement volumétrique entre la phase de α et la phase de γ , et certains modèles peuvent prendre en compte la plasticité du transformation de phases^[1-2]. Ces modèles sont validés par comparaison à de nombreuses expériences. Plusieurs modèles de transformations de phases ont été développés^[3-4], et les applications de tels modèles ont comme conséquence l'amélioration de la prédiction des contraintes résiduelles obtenues par une simulation numérique du soudage. Cependant, dans certaines conditions, l'opération de soudage endommage le matériau et conduit dans les cas extrêmes à l'apparition de fissures lors du refroidissement. L'endommagement peut se développer pendant la transformation de phase. Les dommages induits par la soudure se produisent habituellement pendant l'étape de refroidissement. Il est évident que les propriétés mécaniques des composants ou des structures sont affectées par ces dommages. Ainsi, il est pertinent de tenir compte de l'endommagement dans la modélisation numérique pour l'analyse et la prédiction des contraintes et défauts résultant de l'opération de soudage.

2. Modèle mésoscopique

Le modèle mesoscopique, que nous présentons, est développé en utilisant la méthode de localisation-homogénéisation. La loi de localisation utilisée est celle de Taylor (hypothèse de déformations homogènes dans un milieu hétérogène au comportement non linéaire). Ceci permet de se rapprocher du cas théorique de Leblond dans le cas de phases élasto-plastiques. Le taux de déformation total est séparé en deux, une partie provenant du taux de déformation microscopique total des phases et l'autre partie étant le taux de déformation plastique de transformation de transformation. Avec ces hypothèses nous pouvons écrire :

$$\dot{E}^{tot} = \dot{\epsilon}_i + \dot{E}^{pt} \quad \forall i \quad \text{avec } \dot{\epsilon}_\gamma = \dot{\epsilon}_\alpha \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_i^e + \dot{\epsilon}_i^{thm} + \dot{\epsilon}_i^{vp} \quad \forall i \quad (2)$$

On suppose dans ce modèle que la plasticité classique et la plasticité de transformation sont découplées, ce qui est le cas pour de faibles niveaux de déformations. Les contraintes macroscopiques sont obtenues par la loi d'homogénéisation suivante :

$$\Sigma = \sum_{i=\alpha,\gamma} z_i \sigma_i \quad (3)$$

Une telle modélisation apporte une grande souplesse de calcul. D'une part, chaque phase peut avoir son propre comportement (élasto-plastique, visco-

plastique,...), d'autre part, on garde une grande liberté sur la modélisation de la plasticité de transformation.

La plasticité de transformation est calculée par le modèle de Leblond ^[3-4], sans écrouissage :

$$\dot{\varepsilon}^{pt} = \begin{cases} 0 & \text{si } z \leq 0.03 \\ -\frac{3\Delta\varepsilon_{\gamma-\alpha}^{th}}{\sigma_{\gamma}^y} \cdot S \cdot (\ln z) \cdot \dot{z} & \text{si } z > 0.03 \end{cases} \quad (4)$$

z : Proportion de phase fille (ferrite, perlite, bainite, martensite)

σ_{γ}^y : Contrainte critique d'écoulement viscoplastique de la phase mère

S : Tenseur déviateur des contraintes macroscopiques homogénéisées

$\Delta\varepsilon_{\gamma \rightarrow \alpha}^{th}$: Différence de déformation thermique entre la phase mère et la phase fille

Divers modèles de comportement ont été testés pour les phases. Les déformations élastiques et thermo-métallurgiques sont les mêmes pour tous les modèles.

$$\dot{\varepsilon}_i^e = H^{-1}(T) \underline{\sigma}_i + [\varepsilon_i^{thm}(T) - \varepsilon_i^{thm}(T_{ref})] \quad (5)$$

avec $\varepsilon_i^{thm} = \alpha_i(T) \cdot TI$ pour la phase α , $\varepsilon_i^{thm} = \alpha_i(T) \cdot TI - (1 - z_{\gamma}) \Delta\varepsilon_{\alpha-\gamma}^{T_{ref}}$ pour la phase γ , $H = H_0(1 - D)$ (H est l'opérateur de Hooke, et l'indice 0 représente l'état initial). La variable d'endommagement D est donnée par :

$$D = \frac{S_D}{S} \quad (6)$$

Soit S_D la surface résultant des défauts dans le plan perpendiculaire et S la surface total de la section.

D'un point de vue mathématique lorsque le matériau est sain, la surface S_D est un ensemble vide et donc la variable D est nulle. Lorsque la surface S est totalement endommagée, la valeur de l'endommagement est alors de 1. Dans le cas isotrope, la surface S_D ne dépend pas de l'orientation.

En supposant des déformations homogènes dans chacune des phases (Equ.1), on obtient forcément des déformations plastiques proches. Cependant, la sensibilité aux dommages de l'austénite (assez ductile) est bien plus faible que la martensite, considérée fragile et plus facile à endommager. Par conséquent, seuls les dommages dans la phase α sont pris en considération. La partie suivante donne les équations des modèles utilisés.

Pour la phase austénite, le modèle élasto-plastique à écrouissage cinématique linéaire est employé (sans endommagement).

1. Domaine d'élasticité :

$$f = f(\underline{\sigma}_i, \underline{X}_i) = J_2(\underline{\sigma}_i - \underline{X}_i) - \sigma_i^y \leq 0 \quad (7)$$

2. Loi d'évolution :

$$\dot{\underline{\varepsilon}}_i^p = \frac{3}{2} \frac{\underline{\sigma}_i^D - \underline{X}_i^D}{J_2(\underline{\sigma}_i - \underline{X}_i)} \dot{p}_i \quad (8)$$

$$\underline{X}_i = \frac{2}{3} C \dot{\underline{\varepsilon}}_i^p \quad (9)$$

Pour la phase austénite, le modèle élasto-plastique à écrouissage isotrope et endommageable est employé (Lemaitre Chaboche) [5].

1. Domaine d'élasticité :

$$f = f(\underline{\sigma}_i, R_i, D_i) = \frac{J_2(\underline{\sigma}_i)}{1-D} - \frac{R_i}{1-D} - \sigma_{yi} \quad (10)$$

2. Loi d'évolution :

$$\dot{\underline{\varepsilon}}_i^p = \frac{3}{2} \frac{\dot{p}_i}{(1-D)} \frac{\underline{\sigma}_i^D}{J_2(\underline{\sigma}_i)} \quad (11)$$

$$R_i = c_i(T)(1-D_i) [1 - \exp(-\gamma_i p_i)] \quad (12)$$

3. Evolution de l'endommagement

$$\dot{D} = \frac{D_{cr}}{\varepsilon_{cr} - \varepsilon_{th}} \left[\frac{2}{3} (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right) \right] \dot{p} \quad (13)$$

avec ε_{th} seuil de plasticité, ε_{cr} déformation plastique à rupture du matériau et D_{cr} valeur critique de la variable D décrivant l'endommagement.

3. Modèle de transformations de phases

Pour la transformation austénitique, une loi proportionnelle à la température est utilisée. Et pour la transformation martensitique, on considère la loi empirique de Koistinen et Marburger qui donne la fraction volumique de martensite en fonction de la température sous la forme suivante :

$$z_\alpha = 1 - e^{-\beta \langle M_s - T \rangle} \quad (14)$$

avec z_α proportion volumique de martensite, M_s température de début de transformation martensitique, β coefficient dépendant du matériau, T température.

3. Simulation numérique

Les modèles précédents sont implantés dans le code de calcul par éléments finis Cast3M. Les équations sont intégrées numériquement par l'emploi d'un schéma implicite. Les pas de calcul seront considérés suffisamment petits pour supposer que les taux de déformations sont constants entre deux pas de calcul. Ils ont pour valeur, la valeur à la fin du pas considéré.

Les paramètres de transformation de phase et de l'endommagement de 15-5PH mesurés par des expériences sont exposés dans Tableau 1 et Tableau 2.

Paramètres	M_s	A_{c1}	A_{c3}	$\overline{\alpha}_\alpha$	$\overline{\alpha}_\gamma$	$\Delta\varepsilon_{\gamma-\alpha}^{th}$	β
Valeur	160 °C	760°C	820°C	1.25E-5	2.09E-5	9.58E-3	0.011

Tableau 1. Paramètres de transformation de phase mesurés par des expériences

Température	ε_{th}	ε_{cr}	D_{cr}
20°C	0.01	0.21	0.18
200°C	0.01	0.20	0.07
600°C	0.02	0.19	0.06

Tableau 2. Paramètres de l'endommagement de 15-5PH (phase martensitique)

Le premier exemple est un cube (trois dimensions) avec de chargement de la pression uniaxiale et la température (chauffage et refroidissement). Les résultats numériques ont une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

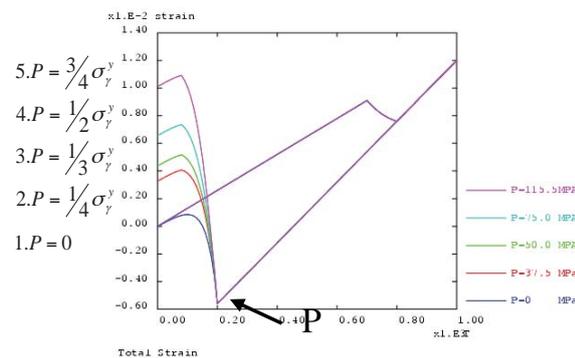


Figure 1. Déformation totale

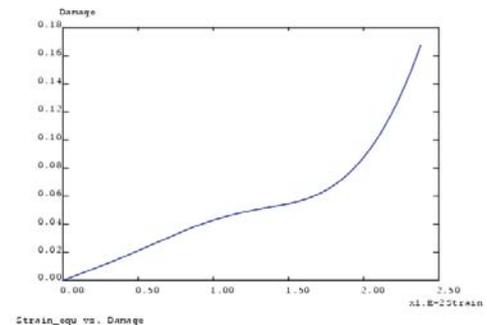


Figure 2. Evolution de l'endommagement

Le deuxième exemple est une éprouvette entaillée. Au début de l'essai, l'éprouvette est en expansion libre durant le chauffage, puis on bloque les deux extrémités pendant le refroidissement. Les distributions de déformation équivalente, contrainte longitudinale et l'endommagement (Figure 3) sont obtenus

par simulation numérique. On observe que la déformation plastique, est la plus importante en fond d'entaille, ce qui conduit cette zone à être la plus endommagée.

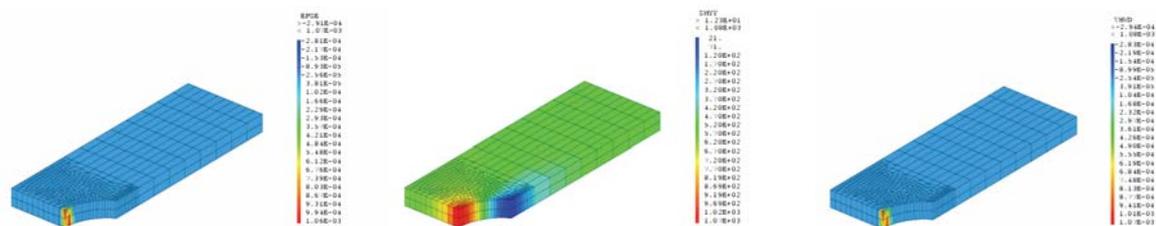


Figure 3. Déformation équivalente, contrainte longitudinale et endommagement

4. Conclusions

Ce travail présente une étude théorique et expérimentale de l'endommagement. Dans cette étude on a développé un modèle mésoscopique pour simuler la transformation de phase, les dommages et contraintes résiduelles. Les travaux en cours portent sur la simulation d'essais réels sur éprouvettes entaillées. Nous pourrons également bientôt simuler un cas simple de soudure réelle.

5. Bibliographie

- [1]. M. CORET, S. CALLOCH AND A. COMBESURE: *Experimental Study of the Phase transformation Plasticity of 16MND5 Low Carbon Steel Induced by Proportional and Nonproportional Biaxial Loading Paths*, European Journal of Mechanics - A/Solids, vol. 23, 823-842, 2004.
- [2]. M. CORET AND A. COMBESURE: *A Mesomodel for the Numerical Simulation of the Multiphase Behavior of Materials under Anisothermal Loading*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 44, 1947-1963, 2002.
- [3]. J.-B. LEBLOND AND J.C. DEVAUX: *A New Kinetic Model for Anisothermal Metallurgical Transformations in Steels Including Effects of Austenite Grain Size*, Acta Metall. 32 (1) 137-146, 1984.
- [4]. J.-B. LEBLOND, G. MOTTET, J. DEVAUX, J.-C. DEVAUX: *Mathematical Models of Anisothermal Phase Transformations in Steels, and Predicted Plastic Behaviour*, Mater. Sci. Technol. 1 815-822, 1985.
- [5]. J. LEMAITRE, AND J. L. CHABOCHE: *Mechanics of Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.