

Titre

Caractérisation et modélisation micromécanique du comportement des alliages métalliques à l'état semi-solide pour la simulation du thixoforgeage des aciers

Résumé de la thèse en français

Les métaux à l'état semi-solide présentent un comportement rhéofluidifiant caractérisé par une forte chute de la viscosité avec la vitesse de déformation facilitant le remplissage des matrices lors de la mise en forme. L'exploitation de ce comportement donne lieu à un procédé de mise en forme appelé « thixoforgeage ». L'état semi-solide est obtenu en refusion partielle à partir de l'état solide et la fraction de solide est supérieure à 0.8. Les plus hautes températures mises en jeu dans le cas des matériaux à haut point de fusion comme les aciers rendent la maîtrise du procédé plus complexe. Cependant, les travaux antérieurs sur le thixoforgeage d'aciers ont montré le potentiel de ce procédé pour réduire la consommation en matière première et en énergie. La thèse s'inscrit dans le cadre du projet TACA «Thixoforgeage d'Aciers pour la fabrication de Composants Automobiles» piloté par l'IRT-M2P. Il ambitionne le développement industriel du thixoforgeage des aciers pour la fabrication de pièces automobiles. La maîtrise et le développement du thixoforgeage nécessite une bonne connaissance du comportement mécanique du matériau à l'état semi-solide et le développement d'outils de simulation numérique adaptés. Ce travail de thèse a pour objectifs de (i) caractériser expérimentalement le comportement thermomécanique des aciers à l'état semi-solide, (ii) développer un modèle de comportement destiné à être implanté dans le logiciel FORGE® pour simuler le thixoforgeage. Une attention particulière a été portée sur le comportement en traction pour caractériser l'intervalle de température dans lequel le matériau devient très sensible à la fissuration à chaud. Des essais en traction menés à différentes températures ont permis de déterminer la température à partir de laquelle la résistance et la ductilité du matériau chutent drastiquement. Les mécanismes conduisant à ces chutes ont été identifiés et sont conformes à ceux décrits dans la littérature. Un modèle basé sur une approche d'homogénéisation qui prend en compte explicitement le rôle mécanique des phases liquide et solide a été développé. Ce modèle repose sur une approche viscoplastique établie

antérieurement puis enrichie afin (i) d'intégrer le comportement élastique du squelette solide saturé en liquide et (ii) distinguer les évolutions de distribution spatiale des phases liquide et solide selon le trajet de chargement en traction ou en compression. Il permet de décrire avec succès, pour la première fois, les trois stades de la réponse mécanique en traction (augmentation, stabilisation puis chute de la contrainte en fonction du déplacement). Le modèle a ensuite été implanté dans le code éléments finis FORGE®. Les simulations des essais de traction GLEBBLE ont permis d'identifier les paramètres du modèle. Des comparaisons des résultats expérimentaux et numériques ont permis de reproduire des phénomènes de localisation de la déformation réelle. Après la validation sur des essais de traction, des simulations de procédés de thixoforgeage industriel, tels que le forgeage de U, ont été étudiées et comparées aux résultats expérimentaux réalisés sur la plateforme Vulcain de l'ENSAM de Metz. Un critère permettant de définir des zones sensibles à la fissuration à chaud a été proposé. La comparaison avec des observations expérimentales a montré que ce critère constitue une première approche encourageante pour prédire les zones de fragilité de la pièce en thixoforgeage.

Characterizing and micromechanical modelling of metals and alloys in the semi-solid state for thixoforging of steels

Résumé de la thèse en anglais

Semi-solid metals and alloys exhibit a shear thinning behavior characterized by a sharp drop in viscosity with increasing strain rate. This property promotes a smooth die filling during forming. To exploit this advantage, several semi-solid forming processes have been developed. Among these processes, we find the thixoforging when the semi-solid state is obtained by a partial remelting from solid state. The solid fraction is above 0.8. Thixoforging of high melting point alloys such as steels is particularly challenging because of about 1400°C

temperatures involved. However, previous works showed that this process reveals high potential to reduce material as well as energy consumption. The present PhD thesis is part of a French research project named TACA «Thixoforging of steels for fabrication of automotive parts» led by IRT-M2P. It aims at industrial development of steel thixoforging for manufacturing automotive components. The mastery and the development of steel thixoforging require a good knowledge of the mechanical behavior of semi-solid steels and appropriate numerical tools to simulate the process. The PhD work aims to (1) characterize the thermomechanical behavior of semi-solid steels and (2) develop constitutive equations that have to be implemented into the commercial code FORGE® to simulate thixoforging. A special attention was paid to the tensile behavior to investigate the temperature range in which the material is very sensitive to hot cracking. Tensile tests provided the temperature from which the material lost its tensile strength and its ductility. Mechanisms leading to the drop of these two properties were identified and were found to be consistent with mechanisms described in literature. A model based on homogenization approach, namely taking explicitly into account the mechanical role of the liquid and solid phases was developed. This model is based on a viscoplastic approach previously developed that was enhanced to (1) include the elastic response of the solid skeleton saturated with liquid and to (2) distinguish the evolution of the spatial liquid/solid distribution according to the tensile or compressive loading path. It successfully describes the three stages of the response in tension: increase, stabilization and decrease of the stress with increasing displacement. The model was implemented in the FORGE® finite element code. The experimental tensile tests were simulated to provide identification of the model parameters. The simulation results showed that strong deformation localization zones were predicted consistently with experiments. Simulations of thixoforging industrial processes such as forging U were studied and compared with experimental results achieved on the Vulcan platform (ENSAM Metz). In addition, a criterion determining the zones without any tensile strength and so sensitive to hot cracking was proposed. Comparison with experimental observations showed that this criterion is an encouraging first approach to predict the brittle zones of thixoforging parts.