



ECOLE DES MINES
DE PARIS
Collège doctoral

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□

THESE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité «Sciences et Génie des Matériaux»

présentée et soutenue publiquement

par

Serge MOTO MPONG

le 12 Décembre 2002

**ETUDE RHEOLOGIQUE ET SIMULATION NUMERIQUE DE
L'INJECTION D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM A L'ETAT SEMI-
SOLIDE**

Directeurs de thèse : Michel BELLET et Lionel FOURMENT

Jury

M. Christophe LEVAILLANT	Président
M. Patrick LABORDE	Rapporteur
M. Michel SUERY	Rapporteur
M. Jérôme FOULQUIER	Examineur
M. Michel BELLET	Examineur
M. Lionel FOURMENT	Examineur

Résumé

Ce travail, qui a été réalisé dans le cadre d'un projet européen, avait pour objectif de faire la simulation numérique de l'injection d'un alliage d'aluminium (A356) à l'état semi-solide. Pour atteindre cet objectif, nous avons travaillé sur deux principaux axes qui sont l'expérience et la simulation numérique. Sur le plan expérimental, l'objectif était de trouver une loi de comportement et ses paramètres pour caractériser le comportement de notre alliage à l'état semi-solide. Cette étude nous a conduit d'une part à passer en revue les différentes classes de loi disponibles dans la bibliographie et à utiliser une loi de comportement viscoplastique, et d'autre part à réaliser un nouveau test rhéologique, le test de l'écoulement de Stephan. Les résultats expérimentaux ont été satisfaisants et l'identification des paramètres a pu être faite, en utilisant une stratégie de type essai-erreur. Ceci nous a permis de trouver pour notre cas des paramètres en concordance avec ceux trouvés dans la bibliographie et d'obtenir un accord raisonnable entre simulation numérique et mesures sur l'ensemble des essais effectués. Sur le plan purement numérique, nous avons dans un premier temps adapté le code de calcul R3 à la mise en forme à l'état semi-solide. Ce travail nous a conduit à y introduire un module de contact matière/matière et à développer le module de contact matière/outil existant. Nous avons alors été confrontés au problème de préconditionnement de la matrice hessienne, dont le conditionnement est fortement dégradé par l'ajout de la condition de non-interpénétration du contact matière/matière. Ce problème a été résolu grâce à l'utilisation du préconditionneur par factorisation incomplète de Crout. Nous avons ensuite travaillé sur la formulation eulérienne lagrangienne arbitraire et sur la procédure de remaillage automatique. Malheureusement, ces travaux ne nous ont pas permis de pouvoir simuler jusqu'au bout le remplissage de pièces industrielles. Nous sommes alors passés dans un deuxième temps à une formulation eulérienne en utilisant le code de calcul Rem3D, initialement développé pour l'injection de thermoplastiques. Nous y avons introduit les termes d'inertie, ainsi que notre loi de comportement. Ce dernier code de calcul nous a alors permis de simuler l'injection de notre alliage d'aluminium à l'état semi-solide. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance avec le procédé industriel et le logiciel peut constituer un outil précieux d'aide à la conception.

Mots clés : mise en forme à l'état semi-solide, expérience d'injection à l'état semi-solide, contact, formulation lagrangienne, formulation eulérienne-lagrangienne arbitraire, formulation eulérienne, inertie, éléments finis, mécanique des fluides.

Abstract

The goal of this work, which has been done within the framework of a European project, was the numerical simulation of the injection of a semi-solid aluminium alloy. In order to reach this objective, the work has been divided into two major parts, which are the experiments and the numerical simulation. Concerning the experiments, the goal was to find a constitutive law and its parameters that characterised as well as possible the behaviour of our alloy in the semisolid state. Therefore we made first a bibliographical study on the laws available from the literature, and we decided to use a viscoplastic law, and then we performed the experiment of the Stephan flow. The experimental results were satisfactory and the identification of parameters had been done, using a trial-error strategy. On the numerical simulation part of the work, we adapted first R3 software to the numerical simulation of semisolid flows, by introducing a modulus contact for the treatment of the folding defects, and we also worked on the contact between rigid moulds and the fluid. We then had a problem of conditioning number for the hessian matrix. This problem had been solved by the use of the uncompleted factorisation of Crout as preconditioner. We then work on the arbitrary lagrangian eulerian formulation and on the automatic mesh generation. Unfortunately, we didn't succeed in the total simulation of the filling of industrial moulds. So, we decided to use Rem3D software, initially developed for the injection of thermoplastics, using a eulerian formulation. We introduced the inertial effects and the constitutive law in Rem3D software, and we simulated the injection of our semisolid aluminium alloys in industrial moulds. The results showed a good agreement between experimental results and numerical simulations. So this software can now constitute a good implement for the conception assistance.

Key words: semisolid forming, semisolid injection experiments, contact, lagrangian formulation, arbitrary lagrangian eulerian formulation, eulerian formulation, inertial effects, finite elements, fluid mechanics.