



## Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8948>

### To cite this version :

Eric BECKER, Guochao GU, Laurent LANGLOIS, Raphaël PESCI, Régis BIGOT - Effets des échanges thermiques sur l'écoulement de l'alliage semi-solide mis en forme par thixoextrusion - In: 20ème Congrès Français de Mécanique, France, 2011-08-29 - CFM'2011 - 2011

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)

# Effets des échanges thermiques sur l'écoulement de l'alliage semi-solide mis en forme par thixoextrusion

E. BECKER<sup>a</sup>, G. GU<sup>a</sup>, L. LANGLOIS<sup>a</sup>, R. PESCI<sup>b</sup>, R. BIGOT<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC) - ENSAM - 4, rue Augustin Fresnel - F57070 Metz Technopôle - France.

<sup>b</sup>Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3) - ENSAM - 4, rue Augustin Fresnel - F57070 Metz Technopôle - France.

## Résumé :

*Le comportement d'un alliage mis en forme à l'état semi-solide n'est toujours pas bien compris. Afin d'établir l'influence de différents paramètres sur l'écoulement de la matière, un processus de thixoextrusion expérimental a été réalisé sur un acier. Les effets de la température initiale du lopin et de l'outillage, de la vitesse de mise en forme et de la présence d'une couche de Ceraspray® à l'interface de l'outil et du lopin ont été étudiés par des expériences et confrontés à la simulation.*

## Abstract :

*Semi-solid processing is an innovative technology for near net-shape production of components, where the metallic alloys are processed in the semi-solid state. Taking advantage of the thixotropic behavior of alloys in the semi-solid state, significant progress has been made in semi-solid processing. However, the consequences of such behavior on the flow during thixofforming are still not completely understood. To explore and better understand the influence of the different parameters on material flow during thixoextrusion process, thixoextrusion experiments were performed using the low carbon steel C38. The billet was partially melted at high solid fraction. Effects of various process parameters including the initial billet temperature, the temperature of die, the punch speed during process and the presence of a Ceraspray layer at the interface of tool and billet were investigated through experiments and simulation. After analyzing the results thus obtained, it was identified that the aforementioned parameters mainly affect thermal exchanges between die and part. Furthermore, the thermal effects can affect the material flow which is composed of various distinct zones.*

**Mots clefs :** semi-solide à haut point de fusion, thixoextrusion, échange thermique, acier C38

## 1 Introduction

La mise en forme ou le thixoforgeage des alliages à haut point de fusion est une solution innovante pour la réalisation de pièces near net-shape [1]. Cela permet d'obtenir des pièces de géométrie complexe, aux propriétés mécaniques élevées tout en réduisant le nombre des étapes de fabrication par rapport aux processus conventionnels de fonderie et de forgeage.

Il a quarante ans une expérience originale a été menée, par des chercheurs au MIT [2], montrant l'intérêt de la mise en forme des alliages à l'état semi-solide. Aujourd'hui l'industrialisation de la mise en forme des alliages à l'état semi-solide, par thixofmage, thixoforgeage, thixoextrusion, etc., est au point pour certaines applications liées aux alliages d'aluminium et de magnésium. En ce qui concerne les processus de thixofmage des aciers, ils sont toujours à l'étape de laboratoire, avec des difficultés liées au haut point de fusion de ces matériaux, la tenue thermique et mécanique des outils de mise en forme, le chauffage et le contrôle précis de la température de mise en forme des lopins.

Pour un certain nombre d'alliages à l'état semi-solide, l'évolution de la fraction liquide-solide en fonction de la température et l'intervalle de température de mise en forme [3], l'évolution de la microstructure [4], la modélisation du comportement et l'écoulement de la matière [5] ont été étudiés par beaucoup de chercheurs. La possibilité de thixoforger de l'acier laminé d'aciérie (nuance sans préparation spécifique) et chauffé par

induction a été illustrée dans les thèses de E. BECKER [6]. et P. CEZARD [7]

Ces travaux ont montré l'importance des échanges thermiques pièces-outils influençant l'écoulement de la matière et l'évolution de la microstructure pendant le processus de thixoforgeage. Une analyse complète du processus de thixoforgeage est donc nécessaire, avec l'étude de l'influence des principaux paramètres influents que sont la vitesse de mise en forme, la température initiale du lopin et la température de l'outil.

Dans ce travail, les effets de divers paramètres du processus sur l'écoulement de la matière (acier C38) pendant la mise en forme par thixoextrusion sont étudiés et les effets des échanges thermiques sur les différents aspects des pièces finales sont discutés.

## 2 Procédure expérimentale

Il s'agit de réaliser une opération de réduction de diamètre (de 40mm à 12mm) à l'aide d'outillages et des méthodes spécifiques mises au point au centre Arts et métiers ParisTech de Metz, afin de répondre au mieux aux conditions extrêmes de mise en forme et de faciliter l'interprétation des résultats.

### 2.1 Matière mise en forme

L'acier C38 utilisé, à faible teneur en carbone, a été produit par laminage à chaud. Sa composition chimique est donnée dans le tableau 1. Les lopins initiaux sont des cylindres de 45 mm de long et de 30 mm de diamètre.

C	Mn	P	S	Si	Al	N	Ni	Cr	Cu
0.418	0.751	0.010	0.021	0.198	0.021	0.065	0.077	0.144	0.133

TAB. 1 – Composition chimique de l'acier C38 à faible teneur en carbone (poids %, équilibre de fer).  
Schémas du principe du réacteur à chaîne compensée.

### 2.2 Méthode et équipement

Le chauffage du lopin a été réalisé par induction en raison de sa bonne répétabilité et du surtout pour le temps de chauffage très court, environ trois minutes pour atteindre 1450°C. De plus, il a pu être intégré dans l'outillage de mise en forme (figure 2) afin de supprimer les pertes de chaleur pendant le transfert du lopin et ainsi maintenir sa température optimale de formage. Afin de vérifier l'homogénéité de la température du lopin avant la mise en forme, quatre thermocouples ont été placés en diverses positions suivant les indications de la figure 1. Une distribution relativement uniforme de la température a été constatée, avec 1 à 10°C de différence entre le centre et la surface du lopin. Pour obtenir ce résultat un cycle de chauffage spécifique a été réalisé : il consiste en plusieurs paliers de puissance séparés par des temps de pause (figure 1).

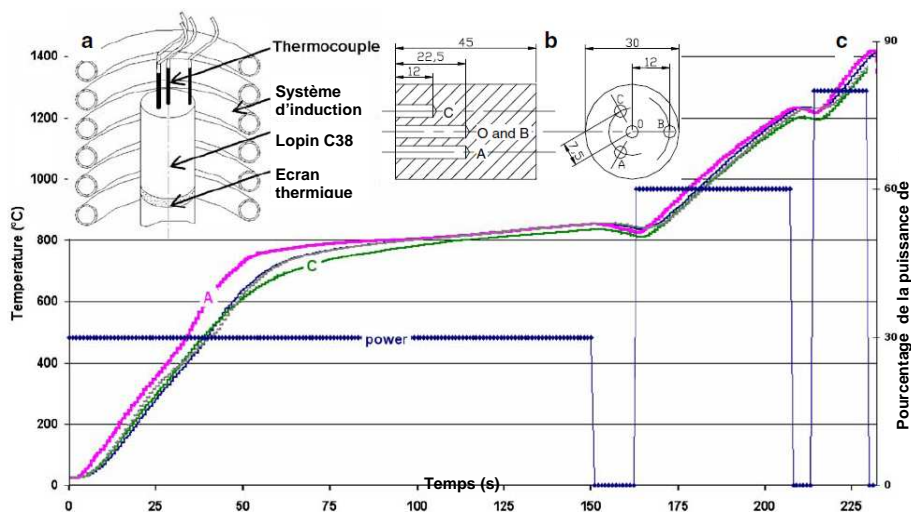


FIG. 2 – Cycle de chauffage du C38 et banc expérimental de mesure.

Afin de permettre une mise en forme à vitesse constante, un système d'absorption de choc (ou de décélération du vérin de la presse) pour le piston et la filière a été développé et intégré dans le dispositif expérimental. La décélération du vérin de la presse s'effectue après la mise en forme. Le dispositif expérimental est illustré sur figure 2 [8].

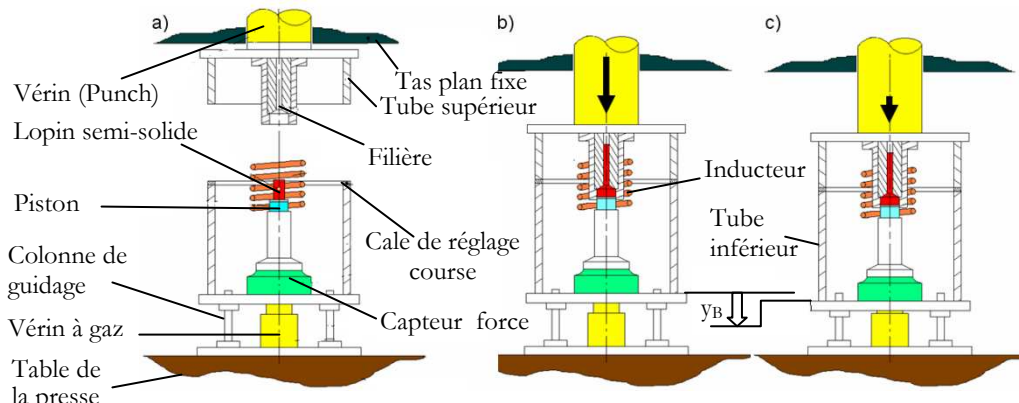


FIG. 2 – Dispositif complet d'extrusion (conception Arts et Métiers ParisTech) monté sur la presse de « ULG » Liège, (a) étape de chauffage avant thixoforgeage, (b) fin thixoforgeage (les tubes sont en contact), (c) étape de décélération de l'outil (compression des amortisseurs).

### 3 Résultats

Des expériences ont été menées sur des lopins en acier C38 avec diverses conditions de mise en forme. Les variables sont la vitesse de mise en forme (de 50mm/s à 215mm/s), la température initiale du lopin avant mise en forme (de 1420°C à 1450°C) et la température de la filière (de 20°C à 400°C).




Pour vérifier la stabilité des expériences, des essais réalisés dans différentes conditions ont été répétés plusieurs fois. Il y a une bonne répétabilité des différents essais et les écarts maximaux entre les essais réalisés dans les mêmes conditions sont de l'ordre de 10%.

Le tableau 2 montre que :

- L'effort de mise en forme diminue en agissant essentiellement sur l'augmentation de la vitesse de mise en forme et sur l'augmentation de la température initiale du lopin.
- La qualité de l'écoulement est nettement améliorée avec l'augmentation de la température de l'outil surtout dans le cas d'une température de lopin élevée.

L'augmentation simultanée de la vitesse de mise en forme et de la température initiale de l'outillage réduit les échanges de chaleur au cours du thixoforgeage. La vitesse de mise en forme détermine le temps de contact outil/matière et la température d'outil détermine le flux de chaleur à l'interface outil/matière. Les gradients de température en peau de pièce sont fortement réduits, le volume de matière demeurant dans un état semi-solide reste prépondérant. La chute de l'effort d'extrusion avec la vitesse de mise en forme provient du caractère thixotrope de l'acier à l'état semi-solide et de la diminution des pertes de chaleur.

En conclusion, pour obtenir une pièce de qualité avec un effort de mise en forme minimisé, il faut thixoforger de préférence à vitesse élevée et outil chauffé, tout en adaptant la température du lopin pour éviter le phénomène d'éjection.

	Vitesse outil [mm/s]	Temp. Outil [°C]	Temp. lopin [°C]	Effort max. [kN]	Nature écoulement	
<b>Vitesse différentes</b>	<b>40</b>	Froid	1429	320	I homogène	
	<b>200</b>			190	II homogène	
<b>Temp. de lopin différentes</b>	200	Froid	<b>1429</b>	190	III homogène	
			<b>1445</b>	135	IV hétérogène	
			<b>1450</b>	85	V hétérogène	
<b>Temp. d'outil différentes</b>	200	<b>Froid</b>	1447	90	VI hétérogène	
		<b>chaud</b>		120	VII homogène	

TAB. 2 – Récapitulatif de l'influence des paramètres de mise en forme ; la vitesse de mise en forme, la température initiale du lopin et la température de l'outil.

#### 4 Discussion

Les résultats décrits ci-dessus ont montré l'impact des paramètres de thixoforgeage sur la force de mise en forme et sur la pièce finale. Ces expériences étant non-isothermes, les échanges thermiques ont été importants entre le lopin et l'outil : ils ont évolué pendant tout le processus d'extrusion. Ces échanges thermiques sont également fonction des paramètres de mise en forme, comme l'illustre la simulation sous Forge 2009 ©, figure 3 (deux vitesses de mise en forme présentées).

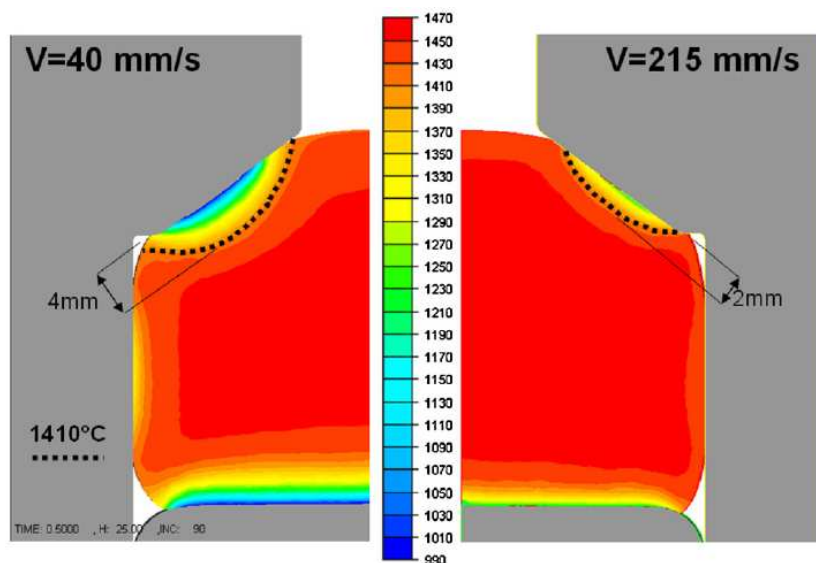


FIG. 3 – Températures simulées obtenues pour deux vitesses de mise en forme (températures initiales de 1410°C pour le lopin et 20°C pour l'outil)

Les variations de température dues au temps de mise en forme et aux échanges thermiques, produisent une évolution de la viscosité, de la désagglomération de la structure du matériau, des contraintes internes et de la fraction liquide-solide, par conséquent de l'effort et de l'écoulement de l'acier le long de la filière, comme le montre les images du tableau 2. L'effort croît lorsque la fraction liquide et la viscosité chutent.

Dans certaines conditions de mise en forme, un écoulement hétérogène a été observé (IV, V et VI tab. 2) Des phénomènes importants d'éjection et de solidification aux parois sont observables. L'écoulement au sein des pièces d'essai est révélé par différents types de macrographies longitudinales. Celles-ci montrent trois zones distinctes d'écoulement :

- une zone où le matériau reste semi-solide,
- une zone de très faible écoulement,
- une zone où le matériau est solide correspondant au forgeage classique.

Les dimensions de ces zones dépendent essentiellement de la vitesse de thixoforgeage et de la température de l'outil. La taille de la zone semi-solide croît avec l'augmentation de la vitesse et de la température de l'outil et ceci au détriment des deux autres zones.

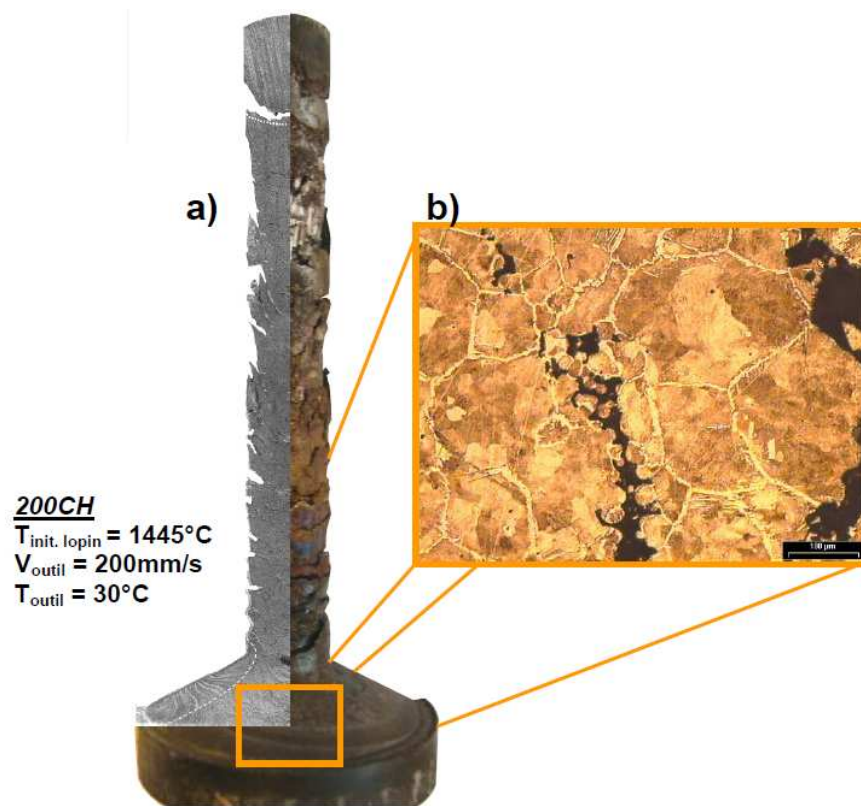


FIG. 4 – *Écoulement hétérogène d'une pièce thixoforgée dans des conditions extrêmes.*

Ce phénomène a été également présenté dans le travail de R. Kopp [9] pour d'autres nuances d'acier.

Pour diminuer ces défauts pour des lopins contenant une fraction liquide élevée, proche de 20%, il faut utiliser un outillage chaud (environ 400°C), des écrans protecteurs pulvérisés sur les zones de contact de l'outil avec l'alliage semi-solide, comme le Ceraspray© ou augmenter la vitesse de mise en forme. Ces précautions permettent de diminuer les échanges thermiques entre l'outil et l'acier semi-solide et ainsi d'obtenir un écoulement plus homogène de la matière pendant la mise en forme, donc de donner des pièces avec de meilleures caractéristiques géométriques et mécaniques. Ces résultats sont corroborés par des études sur d'autres alliages et processus [10] et [11].

## 5 Conclusion

La mise en forme des alliages à haut point de fusion à l'état semi-solide est réalisable si les conditions du procédé de thixoforgeage sont bien maîtrisées. Les avantages sont d'obtenir des pièces near net-shape et des caractéristiques mécaniques supérieures au procédé de fonderie.

Il reste encore de nombreux points à étudier :

Le comportement du matériau à l'état semi solide dépend fortement de la fraction de liquide mais également de la taille et de la forme des zones fondues. La cinétique de fusion de l'alliage entre les températures de solidus et liquidus notamment pour des vitesses de chauffe (500°C/min) correspondant à celles obtenues par induction (industrielle) demeure peu connue. L'impact des hétérogénéités en température reste également à être estimé. Ceux-ci sont dus à la fois aux échanges thermiques comme montré dans cet article mais également à la dissipation liée à la déformation plastique. Le comportement du matériau étant très sensible à la température, au travers de la sensibilité de la fraction liquide à la température, toutes les sources et les pertes de chaleurs doivent être prises en considération pour modéliser et simuler l'opération de mise en forme.

Pour résoudre ces deux derniers points, il est important de disposer un modèle de comportement du matériau à l'état semi-solide [12] capable de rendre compte les caractéristiques de la microstructure et des mécanismes d'agglomération et de désagglomération de celle-ci.

La caractérisation des propriétés mécaniques des pièces obtenues par thixoforgeage, ceci en fonction de l'alliage et des conditions de mise en œuvre du procédé, reste encore à éclaircir. La solidification partielle de l'alliage peut avoir un effet important sur la répartition des éléments d'alliage et les structures métallurgiques obtenues.

A long terme, la connaissance des mécanismes thermophysiques mis en jeu lors de l'opération de thixoforgeage devrait permettre l'élaboration de nuance d'acier pour le thixoforgeage. De premiers essais industriels sont encourageant quand à la réalisation du process et aux résultats des obtenues.

## Références

- [1] P. Kapranos, P.J. Ward, H.V. Atkinson, D.H. Kirkwood, *Materials and Design* **21**, 387-394 (2000).
- [2] M.C. Flemings, *Metallurgical and Materials Transactions A* **22**, 957-981(1991).
- [3] W. Püttgen and W. Bleck, *Steel Res. Int.* **75**, 531-536 (2004).
- [4] W. Püttgen, B. Hallstedt, W. Bleck, J.F. Löffler, P.J. Uggowitzer, *Acta Materialia* **55**, 1033-1042 (2007).
- [5] V. Favier, R. Bigot, and P. Cezard, *Material Science and Engineering A* **517**, 8-16 (2009)
- [6] E. Becker, *Investigations expérimentales et numériques pour l'identification des paramètres clefs du procédé de thixoforgeage de l'acier sur le produit mis en forme*, Ph.D. Thesis, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - ENSAM, 2008.
- [7] Cezard, P., *Impact des effets thermiques sur le comportement du matériau lors de la mise en forme des aciers à l'état semi-solide :analyse expérimentale et numérique*, Ph.D. Thesis, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - ENSAM 2006.
- [8] E. Becker, V. Favier, R. Bigot, P. Cezard and L. Langlois, *Materials Processing Technology* **210**, 1482-1492 (2010).
- [9] R. Kopp, H. Shimahara, J.M. Schneider, D. Kurapov, R. Telle, S. Munstermann, E. Lugscheider, K. Bobzin and M. Maes, *Steel Research International* **75**, 569-576 (2004).
- [10] F. Knauf, R. Baadjou, G. Hirt, R. Kopp, S. Munstermann and R. Telle, "Thixoextrusion," in *Thixofforming- Semi-solid Metal Processing*, edited by G. Hirt and R. Kopp, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, pp. 411-442.
- [11] F. Knauf, G. Hirt, P. Immich, and K. Bobzin, *Influence of tool geometry, tool coating and process parameters in thixoextrusion of steel in 10<sup>th</sup> ESAFORM conference on material forming-2007*, edited by E. Cueto et F. Chinest, AIP Conference Proceedings 907, American Institute of Physics, Melville, NY, 2007, pp. 1173-1178.
- [12] Favier, V., et al., *Micro-macro modelling of the isothermal steady-state behaviour of semi-solids*. International Journal of Forming Processes, 2004. **7**: p. 177-194.