

Développement d'une nouvelle approche pour la modélisation du procédé de laminage circulaire

K. Kpogan¹, G. Vinzant¹

¹ BANNING® GmbH, Angensteinerstrasse 6 CH-4153 Reinach BL, Switzerland, {kpogan,vinzant}@ecai.fr

Résumé — Le but de cette étude est de mettre en place un modèle simplifié pour obtenir une meilleure connaissance du processus de laminage circulaire. Les propriétés mécaniques de la pièce évoluant en fonction de la température et de la géométrie momentanée de la pièce, nous proposons une nouvelle approche de modélisation thermomécanique pour sa résolution. Les résultats sont confrontés à des mesures expérimentales afin de valider la pertinence du modèle.

Mots clefs — Laminage circulaire, calcul numérique.

1. Instructions générales

Le laminage circulaire est un procédé de mise en forme à chaud ou à froid qui se présente comme une technologie unique et efficace de formage de métal incrémental pour la fabrication des couronnes de diverses dimensions.

Au cours du procédé, deux zones de déformations (emprises de laminage radiale et axiale) sont utilisées pour réduire l'épaisseur et la hauteur de la couronne (cf. Figure 1). Dans l'emprise radiale, le mandrin se déplace vers le rouleau principal conduisant à la réduction de l'épaisseur de la paroi et dans l'emprise axiale le cône supérieur se glisse sur le cône inférieur pour réduire la hauteur de la couronne. La conservation du volume de la couronne permet d'augmenter au cours du procédé son diamètre. De ce fait, la qualité de la couronne finie dépend fortement de l'avance du mandrin et du galet conique.

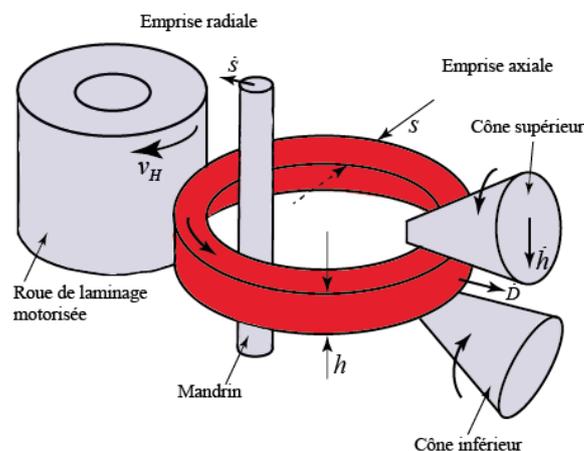


Figure 1 – Illustration schématique du procédé de laminage

Généralement, un laminage circulaire mal contrôlé peut engendrer des défauts multiples notamment l'ovalisation de la couronne, la rétractation de la section ou encore le voilage (cf. Figure 2).

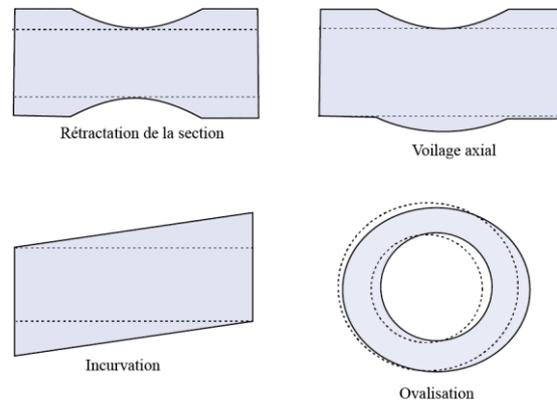


Figure 2 – Défauts usuels en laminage circulaire

Ces défauts constituent l'une des causes majeures des mises au rebut au contrôle final de la couronne laminée. Ainsi, pour livrer les équipements, l'une des problématiques est de fournir aux clients un système de pilotage du procédé pour répondre aux exigences spécifiques des partenaires commerciaux.

L'objectif est ainsi de pouvoir livrer des systèmes de contrôle du processus de production qui peuvent assurer une qualité constante quelles que soient la taille et la forme géométrique de la couronne finie.

Pour contrôler le procédé, il est dès lors nécessaire de mettre en place un modèle numérique basé sur des paramètres, tels que la force de laminage, le couple des moteurs ou encore la vitesse de laminage.

La formulation mathématique de la combinaison de ces variables fournit la clé nécessaire pour contrôler le procédé.

Plusieurs modèles dans la littérature proposent diverses approches pour estimer la géométrie instantanée de la couronne au cours du laminage. On peut distinguer deux sortes de modèles :

- Des modèles simplifiés : basés généralement sur des méthodes empiriques ou encore sur des modélisations bidimensionnelles (2D) du procédé en considérant uniquement la section de la couronne [1-3].
- Des modèles éléments finis tridimensionnels (3D) thermo-elastoviscoplastique prenant en compte toute la géométrie de la couronne [4-5].

Pour notre part, nous proposons une nouvelle approche simplifiée en considérant une modélisation bidimensionnelle thermomécanique. Le modèle implémenté est simple d'emploi et permet de déterminer l'ébauche optimale de manière rétrograde, à partir des caractéristiques d'une couronne finie et en fonction des critères technologiques, ce qui permet d'éviter les défauts de laminage et d'adapter le processus aux performances du laminoir. Le modèle est validé en comparant les résultats par rapport aux mesures expérimentales.

2. Contrôle du process

Nous avons mise en place un ensemble de fonctions de contrôle en se référant aux fonctionnalités réelles de laminage. Dans ce papier, nous nous focaliserons sur la courbe de laminage, la température puis les forces et couples de laminage.

2.1. Courbe de laminage

La courbe de laminage représente le chemin optimal pour passer de l'ébauche à la couronne finale. Elle est déterminée de manière rétrograde à partir de la forme de la section (cf. Figure 3). La formule

ci-après décrit la forme de la courbe :

$$h(t) = \lambda (s(t) - s_0)^\alpha + s_0 \quad (1)$$

Les coefficients λ et α sont déterminés par expérience et sont fonction de la section finale de la pièce. Les variables h et s représentent respectivement la hauteur et l'épaisseur de la couronne en fonction du temps ; s_0 désignent l'épaisseur de l'ébauche.

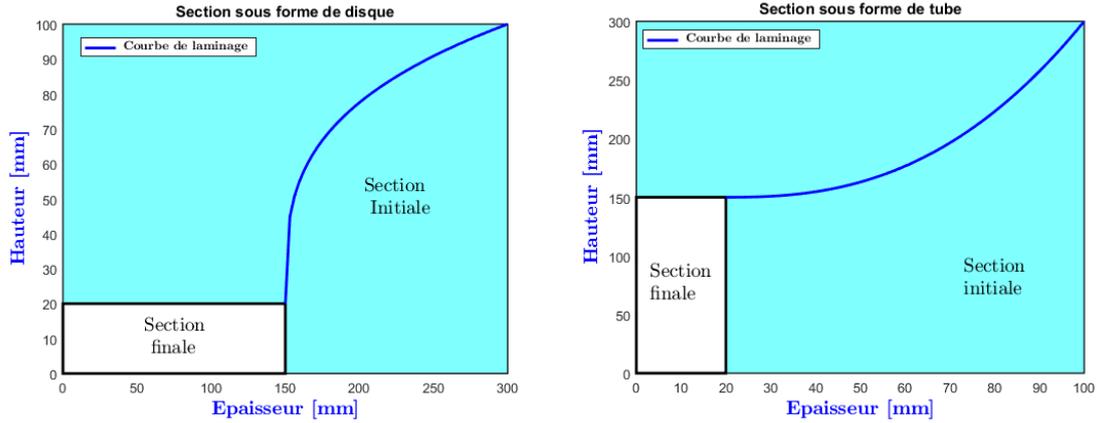


Figure 3 – Courbes de laminage

2.2. Comportement thermique des matériaux

Le bilan thermique pendant une demi-rotation est déterminée en considérant l'accroissement moyen de température par déformation $\Delta\theta_u$, la dissipation ambiante par rayonnement $\Delta\theta_{ray}$ et les pertes par transmission aux galets de laminage $\Delta\theta_r$. Nous négligeons le gradient thermique dans la section de la couronne et le gradient thermique dans le sens périphérique. La température pendant la demi-rotation est alors déterminée par :

$$\theta_{ij} = \theta_{kl} + \Delta\theta_u - \Delta\theta_r - \Delta\theta_{ray} \quad (2)$$

avec

$$\begin{cases} \Delta\theta_u = \frac{\Delta t}{c_p \rho V} \int \bar{\sigma} \left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dt} \right) dV \\ \Delta\theta_{ray} = \sigma \varepsilon \frac{\Delta t}{c_p \rho \Delta V} (\theta_{kl}^4 - \theta_{amb}^4) \\ \Delta\theta_r = kA \frac{\Delta t}{c_p \rho \Delta V} (\theta_{kl}^4 - \theta_{wk}^4) \end{cases}$$

Où σ représente la constante de Stefan-Boltzmann, $\bar{\sigma}$ est la contrainte de Von Mises équivalente, k est le coefficient de transfert thermique, ε est l'émissivité, A est la surface de contact, ρ est la densité volumique, V est le volume au niveau de la surface de contact, θ_{kl} et θ_{ij} sont les températures au cours de la demi-rotation précédente et actuelle, θ_{amb} est la température ambiante et θ_{wk} est la température au centre des galets de laminage.

2.3. Forces et couples de laminage

Le bilan thermique étant effectué, nous avons pu déterminer les forces et couples de laminage axiale et radiale. Les forces sont déterminées à partir de la courbe de contrainte déformation qui

dépend de la température et de la surface comprimée dans les emprises de laminage. Les couples dépendent des forces de laminage. Nous avons donc :

En emprise radiale :

$$F_r = k_r A_r \quad (3)$$

$$M_r = F_r L_r m_r \quad (4)$$

En emprise axiale :

$$F_a = k_a A_a \quad (5)$$

$$M_a = F_a L_a m_a \quad (6)$$

Où les indices r et a représentent les zones d'emprise radiale et axiale. Ainsi, les variables F , M , k , A , L et m désignent respectivement la force, le couple, la résistance de déformation, la surface de laminage dans les emprises radiale et axiale.

3. Résultats numériques

Nous présentons des essais de production et nous comparons les données expérimentales recueillies par rapport aux résultats de simulation de notre modèle. Nous prenons 4 pièces de production parcourant à peu près toutes les gammes de pièces laminées (2 tubes et 2 disques).

Les matières utilisées sont 42CrMo4 (pièce 1 et 3), 16MnCr5 (pièce 2) et C45 (pièce 4). Les tubes et les disques sont soumis à des méthodes de simulations particulières et différentes. Ainsi, en choisissant ces deux types de pièces, nous validons notre modèle sur toutes les pièces à section rectangulaire.

Les pièces de production ont été laminées strictement sur la base des dimensions indiquées dans les formulaires de commande fournis par le client. Il est à noter que les dimensions des ébauches correspondent à celles calculées par notre modèle de simulation.

Les caractéristiques du laminoir sont les suivantes :

Puissance nominale radiale : 250 kW
 Puissance nominale axiale : 160 kW
 Force de laminage radiale max : 80 tonnes
 Force de laminage axiale max : 80 tonnes

Le tableau ci-après montre les dimensions des pièces laminées lors des essais.

Table 1 – Géométrie des pièces de production

	Diamètre extérieur fini [mm]	Epaisseur finie [mm]	Hauteur finie [mm]	Diamètre extérieur ébauche [mm]	Epaisseur ébauche [mm]	Hauteur ébauche [mm]
Pièce 1	900	49	69	349	125	103
Pièce 2	719	71	73	394	115	106
Pièce 3	758	90	62	359	128	126
Pièce 4	1146	132	46	450	169	128

3.1. Discussion sur la courbe de laminage

Les figures 4(a), (b), (c) et (d) représentent respectivement les courbes de laminage des pièces 1, 2, 3 et 4. Les courbes (a) et (b) correspondent à la stratégie de laminage adaptée aux tubes et (c) et (d) la stratégie adaptée aux disques. Ces courbes sont dérivées de notre modèle de simulation. Au départ de laminage, le modèle détermine la courbe optimale qu'il faut utiliser pour mieux répartir le fluage entre les deux emprises de laminage. Ceci permet de limiter les défauts de surface (incurvation) ou de géométrie (ovalisation) à la fin de laminage.

Les courbes théoriques suivent bien les réelles tout au long du process. On peut toutefois remarquer que vers la phase finale de la pièce 4, il y a un écart entre la courbe théorique et la réelle. Ceci s'explique par la modification de la section finale au cours du process par l'opérateur.

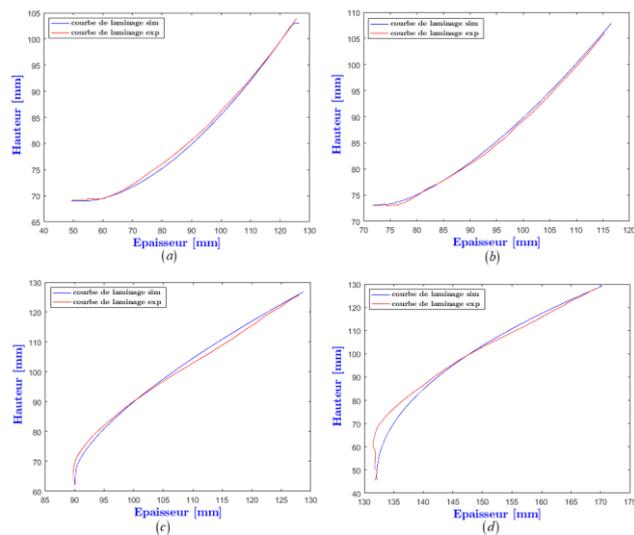


Figure 4 – Courbes de laminage des pièces 1, 2, 3 et 4

3.2. Forces et couples de laminage

Les figures 5(a), (b), (c) et (d) représentent les forces de laminage du modèle de simulation comparées à celles des pièces laminées. On remarque que le modèle de simulation prédit bien les profils de force. Nous rappelons que nous avons utilisés 3 matières pour les essais des 4 pièces, ce qui montre que notre modèle peut être élargi à tout type de matériau dont les caractéristiques métallurgiques sont connues. Par ailleurs, on observe un léger écart entre les forces radiales pour les pièces 3, 4 et 5 qui peut être expliqué par les frottements entre les outils et les pièces ou encore par les variations de températures internes dans le local de la machine qui peuvent influencer sur le refroidissement de la pièce. Il s'en suit également que ces écarts sur la force radiale impactent le calcul du couple. Par conséquent, ces légers écarts s'observent également sur les couples radiaux (figures 16(b), (c) et (d)). Le modèle de simulation prédit bien les couples axiaux. Il est à noter que ce qui intéresse le client ce sont les forces et couples maximaux à utiliser pour laminier des pièces. Ceci permet de dimensionner, pour une pièce donnée, la machine correspondante.

Les comparaisons effectuées lors de ces 4 essais de laminage indiquent que lorsque les essais se déroulent sans heurts (ovalisation ou encore torsion de la pièce), les valeurs des paramètres du processus expérimental sont en accord raisonnable avec celles calculées par le modèle de simulation.

Les calculs de la température, de la force et des couples de laminage sont satisfaisants pour la simulation des pièces ayant des formes de tube et de disque.

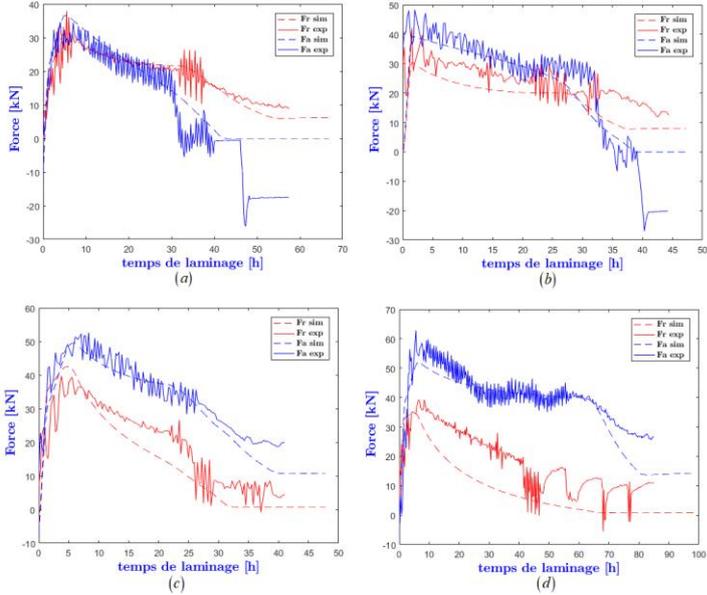


Figure 5 – Forces de laminage

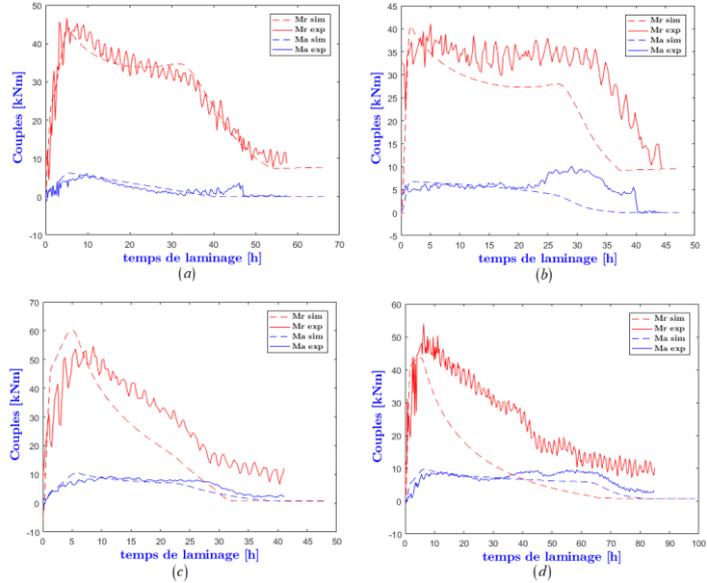


Figure 6 – Couples de laminage

4. Conclusions

L'objectif du présent projet était de développer un outil permettant une modélisation du procédé de laminage circulaire pour un mode d'emploi simple et peu coûteux en temps de calcul.

Pour mettre en place le modèle, nous nous sommes basés sur une approche simplifiée en considérant une modélisation bidimensionnelle thermomécanique. Le modèle est instantané et permet de prédire la géométrie momentanée de la couronne, la température puis les forces et couples de laminage.

Des essais expérimentaux ont été effectués pour la validation du modèle développé. Suite aux comparaisons effectuées avec les résultats expérimentaux, nous retenons que notre modèle donne des résultats satisfaisants. Il prédit bien la géométrie de la pièce au cours du procédé de laminage. Nous obtenons un bon accord de l'évolution des forces et couples de laminage par rapport à l'expérience.

Dans un travail prospectif, nous souhaitons poursuivre les essais expérimentaux afin d'explorer les limites du modèle. Il serait également intéressant d'étendre les fonctionnalités de notre modèle à des couronnes à sections profilées.

Références

- [1] U. Koppers. Geometrie, kinematik und statikbeimwalzen von ringenmitrechteckquerschnitten, Verlag Stahleisen, 1987.
- [2] U. Koppers. Optimizing the ring-rolling operation with process control, JOM, 24-27, 1992.
- [3] G. A. Berti, L. Quagliato, M. Monti. Set-up of radial-axial ring-rolling process: Process worksheet and ring geometry expansion prediction, International Journal of Mechanical Sciences, 58-71, 2015.
- [4] K. Davey, M. J. Ward. An ALE approach for finite element ring-rolling simulation of profiled rings, Journal of Materials Processing Technology, 559-566, 2003.
- [5] D. S. Qian, G. Zhou, L. Hua, D. F. Shi, H. X. Li. 3D coupled thermomechanical FE analysis of blank size effects on radial-axial ring rolling, Ironmaking & Steelmaking 360-368, 2013.