

Synthèse du symposium 1 des Journées Annuelles de la SF2M

IOM3 / SF2M Symposium on Modelling of Rolling processes

Les tendances de la modélisation en réponse aux problématiques de fabrication par laminage

Pierre MONTMITONNET, Didier FARRUGIA

L'Institute of Materials, Minerals and Mining (UK) et la SF2M ont décidé de proposer un symposium sur la modélisation du laminage et opérations connexes aux Journées Annuelles. L'appel à communications a été lancé à l'échelle européenne, à des exposés en anglais. Les conférences finalement retenues témoignent de la diversité des problématiques liées au laminage et en dessine les principales lignes de force, précisées davantage lors de la table ronde qui a conclu ce Symposium.

Le laminage est maintenant autant un traitement thermomécanique qu'une mise en forme (cf le laminage contrôlé des aciers micro-alliés, maintenant bien établi mais qui progresse encore, comme en témoignent les deux exposés présentés). Dans une industrie de plus en plus pilotée par la demande de matériaux innovants, multifonctionnels, adaptés aux besoins du client, la modélisation prédictive des propriétés du matériau tend à prendre le pas sur la modélisation du (des) procédé(s), considérée – peut-être un peu vite – comme bien maîtrisée. Dans cette optique, il devient de plus en plus difficile de se contenter de prendre en compte le matériau comme un milieu homogène : l'hétérogénéité est désormais une caractéristique à part entière, essentielle pour la compréhension de l'apparition des défauts, pour la prédiction des propriétés finales, et dans certains cas pour le contrôle même du procédé. Ceci renforce la tendance au calcul multiéchelle, l'échelle du procédé dialoguant avec l'échelle de la microstructure. On pourra se reporter aux exposés de l'Action nationale de Formation « Métallurgie Fondamentale » du CNRS, à Aussois la semaine avant les JA, pour un tour d'horizon très complet de ces doctrines (<http://metallurgie2012.sciencesconf.org>).



La modélisation du matériau est de plus en plus imbriquée dans la modélisation du procédé. Elle fait appel à des descriptions plus locales du matériau (interactions de rugosités pour décrire la tribologie, description par automates cellulaires de l'évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques).

L'endommagement ductile reste un problème du premier ordre. Si les approches présentées ici (trois exposés) étaient plutôt macroscopiques et phénoménologiques, on sait que la mécanique multiéchelle de l'hétérogénéité est en première ligne.

Les lois de comportement, plasticité comme frottement, restent des pierres d'achoppement de la modélisation. On est loin d'avoir fait le tour du comportement plastique: il nous a été montré combien il pouvait être sensible, même dans des procédés en grande déformation, au caractère cyclique de celle-ci.

Le laminage est un procédé thermo-mécanique. La sensibilité aux paramètres thermophysiques du matériau laminé pour la conduite du laminoir, la thermique des cylindres (un des points les plus faibles de la modélisation du laminage), font partie des questions abordées dans ce Symposium. Une meilleure prise en compte passe avant tout par une meilleure mesure des propriétés de transfert aux interfaces, solide – solide (produit – cylindres) comme solide – fluide (jets de refroidissement en tous genres). C'avait été le thème d'une journée d'échanges scientifiques avec la Société Française de Thermique en Février dernier (<http://www.sft.asso.fr>). Ici, des méthodes puissantes et rapides nous ont été détaillées dans l'un des exposés pour remonter d'une mesure interne de température à la température de surface et au flux échangé. La thermique du contact solide – solide a été appliquée aussi au chauffage des bobines lors du recuit base, ou leur refroidissement après laminage.

On peut encore faire des progrès en modélisation des procédés, un par un. Par exemple, prendre en compte la régulation dans la modélisation devient possible et permet de mieux prendre en compte la réalité du chemin de déformation ou de tester virtuellement, sans perte de matière, les paramètres d'un PID (laminage d'anneaux, planage des tôles). D'autre part, la modélisation des très importants problèmes de planéité reste embryonnaire.

Cela montre que l'instationnarité revient en force, dans un procédé que l'on a beaucoup modélisé en stationnaire pour gagner du temps. Cette tendance est renforcée par les procédés *flexibles*, dans lesquels la géométrie ou les propriétés de la section du produit varient le long de la direction de laminage – pour l'allègement ou l'économie de matière première (keynote de M. Carruth).

On a besoin de modèles rapides de procédé, pour lesquels la méthode des tranches (discrétisation 1D) reste la base conceptuelle, mais doit être *enrichie* pour atteindre précision et réalisme nécessaires : enrichissement par des termes de cisaillement pour les produits « un peu plus épais », enrichissement de la loi de frottement par de la modélisation FEM 3D de l'écrasement des aspérités.

Le chaînage des opérations (« through process modelling ») est une nécessité industrielle. Une action forte de démonstration a été citée dans la Keynote de G. Hirt : la modélisation de la fabrication de tubes roulés – soudés, du réchauffage des brames à la soudure en passant par le laminage à chaud et le cintrage par « roll forming ». Un autre exposé au moins a abordé cette problématique, expliquant un défaut détecté après le laminage à froid de tôles, mais initié par le cisailage des rives préalable. Lors de la Table Ronde, D. Farrugia est revenu sur ce point en évoquant les principales stratégies logicielles de coopération entre modèles (« vers l'Usine Virtuelle »).

Il était certes impossible, en quatorze exposés, de couvrir tous les aspects d'une dizaine de procédés sur les nombreux métaux et alliages dont les propriétés physiques conduisent à décliner des questions générales en problèmes spécifiques. Mais nous pouvons dire que nous avons eu un bon aperçu des principales avancées des techniques de modélisation à mettre en œuvre dans un proche avenir. La Table Ronde de l'après-midi a complété ce tour d'horizon. Elle a été introduite par une discussion autour des priorités du programme de recherche sidérurgique RFCS (Research Fund for Coal and Steel) et les grands enjeux de cette recherche dans les prochaines années : développer des aciers innovants et de nouvelles technologies (réduction du nombre d'étapes de fabrication) pour réduire les coûts et garder une certaine compétitivité ; contrer les difficultés d'approvisionnement en certaines matières premières ; réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. Même si ces grands axes de recherche prioritaires ne mentionnent pas explicitement le laminage, il peut trouver sa place dans plusieurs



(efficacité énergétique, contrôle intégré sur deux étapes de fabrication, mesure et contrôle, nouveaux aciers).

Les participants ont évoqué comme principaux « points durs » de la modélisation :

- L'élargissement des barres ou brames,
- La prévision de microstructures avec l'impact complexe de la précipitation, la prédiction des textures,
- L'évitement des porosités et criques, mais aussi la physique et la modélisation de leur refermeture et plus encore de leur guérison (healing) dans les conditions compressives du laminage. Le Symposium 1 a d'ailleurs été suivi d'une journée d'échanges entre industrie et monde académique sur la modélisation des criques (endommagement, porosités, fissuration) qui, autour de problèmes concrets de divers laminages de divers alliages, a fait le point des approches possibles, expérimentales comme modélisatoires, phénoménologiques comme multiéchelles.

La forte poussée de l'instrumentation des laminoirs eux-mêmes a enfin été soulignée. Un des plus difficiles reste la mesure thermique dans l'emprise (voir plus haut les possibilités qui se profilent), mais on peut désormais espérer visualiser et analyser à moyen terme non seulement des efforts et des grandeurs mécaniques globales comme c'est le cas actuellement, mais l'aspect de surface ou l'épaisseur d'oxyde en continu, ou encore la microstructure – taille de grain, morphologie, état inclusionnaire – ou les criques. Ces techniques ouvrent des perspectives considérables et pourraient faire l'objet d'un Symposium dans le futur.

Finalement, est-ce par la modélisation, ou par la mesure et le contrôle automatique, que passe l'avenir du laminage et l'atteinte des objectifs rappelés ci-dessus ?

Liste des exposés

(Un numéro spécial de [Matériaux & Techniques](#) est prévu.)

KEYNOTES

Current objectives and approaches in simulation and modelling of rolling processes

G. HIRT (Institute of Metal Forming, RWTH Aachen, Germany), V. JENKOUK, T. ROMANS, S. SEUREN

Flexible Forming: a survey of novel processes and future technologies

M. CARRUTH (Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, UK)

CONFERENCES

Plate Mill Design: an application of microstructure modelling

J. HINTON (Siemens VAI Metal Technologies, Sheffield, UK), J. LEE, M. STEEPER, R. DOELL

Effect of temperature, strain and interpass time on microstructural evolution during plate rolling

J. PYYKKÖNEN (Mat. Engg Lab., University of Oulu, Finland), P. SUIKKANEN, M. SOMANI, D. PORTER

Inverse 3D method for fast evaluation of temperature and heat flux fields during rolling process

D. WEISZ - PATRAULT (Ecole Ponts ParisTech, UR Navier, Marne La Vallée) A. EHRLACHER, N. LEGRAND

3D Modelling of asperity crushing

Y. CARRETTA (Aerosp. Mech. Engg Dept, U. Liège, Belgium), R. BOMAN, N. LEGRAND, M. LAUGIER, J.-P. PONTHOT

Thermal model of coil annealing and calibration against experimental data.

S. ROGERS (Innoval Technology Limited, UK)

Numerical analysis of strain inhomogeneities during cold rolling of flat products and its influence on further material processing.

T. MADEJ (AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland), Ł. SIERADZKI, R. GOŁĄB, K. PERZYŃSKI, R. KUZIAK, M. PIETRZYK

Comparative study of phenomenological coupled damage models – Application to industrial forming processes

T.-S. CAO (MINES ParisTech, CEMEF, Sophia-Antipolis), C. BOBADILLA, P. MONTMITONNET, P.-O. BOUCHARD

Finite element simulation of cold pilgering of ODS tubes

E. VANEGAS MARQUEZ (CEA/DEN/Service de Rec. Métal. Appl., Gif-sur-Yvette), K. Mocellin, L. Toulbi, Y. de Carlan, R.E. Logé

Influence of edge - trimming on the cracking of steel strip edge in cold rolling

A. DUBOIS (PRES Univ. Lille-Nord de France), C. HUBERT, M. DUBAR, L. DUBAR

Coupled rolling and buckling model for friction - sensitive setting of flatness actuators

R. NAKHOUL (Mines ParisTech, CEMEF, Sophia-Antipolis), S. ABDELKHALEK, P. MONTMITONNET

Arbitrary Lagrangian Eulerian modelling of tension levelling

R. BOMAN (Aerosp. Mech. Engg Dept, U. Liège, Belgium), A. PARRICO, N. LEGRAND, J.-P. PONTHOT

Implementation of closed - loop control systems in Finite Element simulations of roller leveling

M. OLIGSCHLÄGER (Institute of Metal Forming, RWTH Aachen University), G. HIRT.