

Réunion de la Commission Thématique Laminage de la SF2M

16/03/2022, 13h30 - 18h00

Essais en production, machines pilotes : les « grands instruments » de la mise en forme

- 13h30 – 14h15 [Ariane VIAT \(Constellium C-TEC, Voreppe\) : Laminage à froid pour prototypage sur aluminium](#)
Le laminage à froid « Armines » de Constellium est l'outil d'essai principal pour simuler expérimentalement le laminage à froid. Conçu à l'origine par le CEMEF, ce laminage fonctionne entre une bobineuse et une débobineuse, pour des bobines de largeur nominale 3 cm. Il ne s'agit que d'un exemple de changement d'échelle conséquent entre ce laminage Armines et un laminage d'usine, mais les faibles dimensions des cylindres permettent d'y usiner des textures variées, à moindre coût. Nous aborderons les applications principales pour lesquelles le laminage Armines est utilisé : essais d'huiles entières, de texture de cylindres, de rectification, ou encore de revêtements de cylindres. Il a même été possible de reproduire un défaut vu en usine, afin d'identifier les paramètres clé d'apparition dudit défaut.
- 14h15 – 15h00 [Florian LYONNET, Jean-Luc DOUDOUX \(Framatome, Paimboeuf\) : Instrumentations sur laminage à pas de pèlerin industriels : enjeux, revue des techniques et leurs évolutions.](#)
De par la complexité de la cinématique du laminage à pas de pèlerin des tubes, les instrumentations d'un laminage industriel sont aussi délicates à mettre en œuvre qu'elles sont riches en information. Des travaux de longue haleine menés depuis les années 1990 ont permis d'établir des connaissances solides du procédé. Les exigences toujours plus fortes sur les cadences de laminage et la qualité des produits augmentent la sensibilité aux perturbations, en particulier celles en lien avec le système de lubrification. Le redéploiement des instrumentations aidé par les nouvelles techniques est alors nécessaire.
- 15h15 – 16h00 [Laurent LANGLOIS \(ENSAM / LCFC, campus de Metz\) : Evolution of the solidification microstructure during hot forming.](#)
Le LCFC développe depuis plus de dix ans des simulateurs à échelle réduite des procédés de mise en forme. Il s'agit de mettre en place des essais de mise en forme reproduisant les caractères essentiels du chemin thermomécanique et de l'état initial du matériau vis-à-vis des différents phénomènes métallurgiques étudiés. La méthode de conception des simulateurs débute par l'identification des caractères essentiels pilotant le phénomène étudié et l'écriture des critères de représentativité. Le procédé industriel est ensuite étudié et simulé pour spécifier les critères de représentativité. Le cahier des charges ainsi constitué sert ensuite de base pour la conception du simulateur expérimental. Jusqu'à aujourd'hui, les simulateurs conçus et mis en œuvre concernent la fermeture des retassures lors du laminage de blooms (fabrication de barres) et la recristallisation des structures de solidification en étirage.
- 16h00 – 17h00 [Discussion libre autour de quelques points importants :](#)
- quel degré de similitude, comment effectuer le recalage pilote / production ?
 - modes de fonctionnement de machines de mise en forme en milieu académique (enseignement / études internes / études partenariales / mise à disposition de l'équipement et du personnel)
 - modes de fonctionnement de machines de mise en forme en milieu académique : impact des coûts, des contraintes réglementaires (HSE) ?
 - répartition des tâches lourdes entre entreprises, laboratoires académiques, IRT ?
 - mesures thermiques en ligne ?
- 17h00 – 17h30 [Programmation des prochaines journées de la CT Laminage](#)

Laminoir d'essai à froid pour prototypage sur aluminium (Ariane VIAT, Constellium C-TEC, Voreppe)

Ce premier exposé et la discussion qui l'a suivi illustrent les capacités offertes par l'utilisation d'un laminoir d'échelle réduite dans un environnement industriel de R&D, ainsi que ses limites et les difficultés pratiques. L'ancien laminoir pilote à froid du CEMEF, transféré en 2005 à Voreppe, est utilisé régulièrement par 5 ingénieurs de recherches de C-TEC pour leurs projets sur diverses thématiques : compréhension et résolution de problèmes en production, formulation de lubrifiants, ingénierie des cylindres (revêtements ou rugosité). Le rappel de ses caractéristiques force / vitesse / puissance montre un outil raisonnablement représentatif de la réalité industrielle grâce à la grande vitesse atteinte (1000 m/min), la possibilité, en cours de ré-implémentation, d'amener les bandes aux températures réelles de laminage sur tandem, ~100°C, ou son système de lubrification réaliste. Ainsi, réduction, vitesse et tensions de bande sont identiques à la pratique industrielle.

Les écarts à la réalité sont la faible largeur, 30 mm maximum, la faible taille des cylindres (diamètre maximum 150 mm, en fait généralement < 100 mm), la difficulté de mener des campagnes longues pour étudier l'usure des cylindres ou atteindre un régime thermique stabilisé pour les cylindres.

Inversement il est adaptable, bien plus souple et accessible pour des essais qu'un laminoir de production : petite taille et coût raisonnable des cylindres d'essais, facilité à les faire revêtir, cylindres à inserts pour analyses ultérieures, possibilité de mesures et caractérisations, quantité raisonnable du métal consommé.

Des travaux sont en cours pour supprimer un faux-rond des cylindres dû aux allonges, améliorer la régulation des tensions ou obtenir une mesure fiable de la température d'emprise, mieux gérer les effluents dont les vapeurs de kérozène.

Quelques exemples d'études illustrent ces potentialités et ces difficultés :

- l'étude des défauts en chevrons en rives de bandes, formant des stries obliques à contraste de matité. Leur origine doit combiner vibrations, profil / planéité et phénomènes adhésifs. Les essais ont reproduit ce phénomène, avec des caractéristiques, fréquences ou contrastes de brillance spécifiques du laminoir utilisé. Les variations paramétriques ont alors dégagé un taux minimal d'additifs pour ne pas voir apparaître le défaut, conclusions qui ont été appliquées avec succès en production ;
- Des études comparatives d'additifs de lubrification, avec la difficulté que les différences entre eux, souvent subtiles, réclament une grande constance des conditions de laminage (vitesse, réduction, tensions de bande) qui peuvent mettre en défaut les régulations actuelles du laminoir pilote ;
- la mise en évidence de l'effet de la rugosité de rectification des cylindres sur le frottement ;
- la possibilité de texturation de surface de bande en laminant à faible réduction avec des cylindres EDT (Electro-Discharge Texturing) ;
- la recherche de revêtements alternatifs au chrome dur (bains au Cr^{VI}, bientôt banni par REACH), travail en cours dans un projet européen.

Discussion

- possibilité de tester des émulsions ? oui, ça a été fait sur ce laminoir mais (Pierre Montmitonnet [PM]) il faut prêter attention aux systèmes de contrôle correspondants : déionisation de l'eau, agitation dans le bac, anti-mousse, vitesses de cisaillement dans les pompes <-> taille de gouttelettes...
- (Thomas Sourisseau [TS]) peut-on se servir d'un tel laminoir avec un modèle inverse pour remonter aux courbes contrainte-déformation à grande vitesse de déformation ? (Ariane Viat

[AV]) Ca n'a pas été fait et il y aurait une double difficulté : l'impact fort du frottement du fait des fines épaisseurs et l'échauffement par déformation qui, au moins pour l'aluminium, est rhéologiquement non négligeable. (Vincent Duhoux [VD]) Constellium utilise pour ce faire (à chaud seulement) le poinçonnement sur une machine Servotest.

- (TS) aborde aussi la mesure de température. (VD) explique qu'elle est rendue difficile par la faible émissivité de la surface de l'aluminium jointe aux températures relativement basses en laminage à froid. De ce fait les caméras thermiques ou pyromètres sont moins précis sur le plan quantitatif. Diverses solutions sont à l'étude. La mesure dans le coin entre embarreur et bande pêche par une bande probablement déjà nettement refroidie à cet endroit ; on peut faire la mesure plus près de l'emprise, donc avec forte présence d'huile, en spécifiant une longueur d'onde caractéristique de l'huile, sous réserve qu'on mesure sur un film d'huile qui prend la température de la bande et non en surface d'une « piscine » ...
- (Didier Farrugia [DF]) Des thermocouples peuvent être implantés pour la température de surface du cylindre : cf Projet RFCS Roll Gap Sensors, sur la base CORDIS...
Devant ces difficultés, des échanges avec la Société Française des Thermiciens (SFT) sont évoqués.

[Instrumentations sur laminoirs à pas de pèlerin industriels : enjeux, revue des techniques et leurs évolutions \(Florian LYONNET, Jean-Luc DOUDOUX, Framatome\)](#)

Florian passe un peu de temps à décrire les tubes-gaines et ce procédé très spécial qu'est le laminage à pas de pèlerin. Plutôt qu'un dispositif en laboratoire, la démarche R&D utilise l'instrumentation de laminoirs de production car les machines elles-mêmes sont « à taille humaine ». Du fait de la faible productivité d'un laminoir, un même atelier en contient plusieurs dont un peut être utilisé épisodiquement pour des essais de tous types : lubrifiants, états de surface des outils, chemin de déformation par le dessin des outillages, conditions de laminage (avance, rotation, cadence)... La principale difficulté est de concevoir, réaliser et maintenir un système de mesures suffisamment complet pour répondre à une grande diversité de questions :

- le fonctionnement du laminoir au nominal, la bonne synchronisation des mouvements de la cage, de l'avance de l'ébauche, de sa rotation... ;
- l'acquisition de données suffisantes pour critiquer et faire progresser la simulation numérique, un autre outil important de la R&D de Framatome ;
- la lubrification étant une des voies de progrès identifiées, mieux approcher ses conditions de travail (température de contact en particulier).

La difficulté est que le cœur du système (le contact mandrin/tube/matrice) est situé dans une cage fermée, largement arrosée de lubrifiant, en mouvement sinusoïdal rapide à 5 Hz. La radio-transmission du signal fonctionne bien et a permis de faire vivre ces mesures depuis les premières tentatives fin des années 1980 et leur fiabilisation dans les premières années 1990. Citons :

- l'instrumentation du mandrin en position, en force axiale et la relation entre les deux par la rigidité de la tige-support de 10 m de longueur, rigidité grande en traction mais faible en compression du fait du flambement; la force axiale devrait être un bon indicateur de collage / transfert adhésif qui dégrade l'état de surface interne du tube ;
- des tentatives de mesure de température par papier thermosensible, par perçage du mandrin et insertion de thermocouple, mais la rupture peut s'ensuivre rapidement... Une nouvelle tentative est en cours, perçage par l'amont cette fois ;
- l'instrumentation des matrices en force verticale, du chariot d'avance en force axiale ; la mesure de l'ensemble des forces axiales devrait permettre un accès relativement précis aux coefficients de frottement tube / mandrin et tube / matrice.

- des tentatives infructueuses pour mesurer en continu le mouvement de l'arrière de l'ébauche, supposée fixe entre deux avances-rotations dans la modélisation mais de fait dotée d'une certaine capacité de mouvement.

Mouvement mandrin et mouvement ébauche conditionnent la conjugaison matrice-mandrin et l'historique de la déformation en épaisseur par rapport à la déformation en diamètre, un fondement du laminage à pas de pèlerin dans la mesure où leur rapport, le « Q_p », conditionne la texture.

Cet ensemble de mesures n'est pas incompatible avec la production. D'autres essais, plus perturbateurs mais éclairants sur les mécanismes de déformation, ont consisté à insérer des fils radiaux dans la paroi de l'ébauche pour mesurer le cisaillement (r,z) par leur inclinaison vers l'avant. Le rédacteur tire aussi de ses souvenirs la mesure par l'écrasement d'un fil d'indium (métal très mou) de la « fente de laminage » (espace entre les bandes de roulement des matrices lorsque la force verticale dépasse la précontrainte) pour vérifier la rigidité de la cage ; les arrêts instantanés pour extraire la forme du tube entre ébauche et tube fini, géométrie dite « transition », pour en faire une mesure 3D capitale pour la stratégie de simulation numérique du régime stationnaire ; la mesure de la longueur de contact par pincement entre les deux matrices d'une telle « transition » recouverte de peinture... De telles expériences « limites » ont évidemment été plus épisodiques ! Elles ressemblent d'ailleurs à ce qu'on ne se permet en général que sur un laminoir pilote.

Discussion

- (DF) aborde des techniques de mesure alternatives : Digital Image Correlation (DIC), fibres optiques à réseaux de Bragg.
 - * Des mesures de visioplasticité ont été utilisées historiquement (UK, Japon) pour mesurer toutes les composantes de déformation en fonction de la position : laminage d'une « transition », gravure d'un quadrillage sur la zone de déformation, repositionnement et laminage d'un coup de cage, puis mesure des incréments de déformation du quadrillage.
(Florian Lyonnet [FL]) Si on veut effectuer toute une passe de laminage, le quadrillage disparaît sauf à être très profondément gravé et donc perturbateur.
 - * Les fibres optiques à réseaux de Bragg permettent de mesurer des déformations élastiques et sont donc utiles pour les outillages. C'est désormais une méthode standard en Health Monitoring des ouvrages de Génie Civil par exemple - cf le projet Roll Gap Sensors de nouveau, où elles ont été mises en œuvre dans un rouleau de planéité par le LIST, CEA Saclay. Il existe des techniques pour corriger les effets de dilatation thermique -> sans doute une possibilité de mesure de température à peu de distance du contact, mais un thermocouple est plus simple à utiliser pour cela.
- (TS) y a-t-il d'autres composantes de force à mesurer ? (FL) oui. On mesure la force normale sur les matrices, mais aussi les forces longitudinales sur le mandrin et parfois sur l'ébauche (mesure sur le chariot auquel la force est transmise). (PM) la simulation montre aussi une force transverse non négligeable, qui n'a jamais pas mesurée (elle pourrait l'être en cas de besoin).

[Evolution of the solidification microstructure during hot forming](#) (Laurent LANGLOIS, ENSAM / LCFC, campus de Metz)

La plate-forme Vulcain fait partie des moyens phares du Laboratoire Conception-Fabrication-Commande (LCFC). Elle combine four, presses, robot 6 axes pour la manipulation des échantillons et moyens de mesure (caméra rapide et caméra IR). Elle est utilisée pour l'enseignement et pour la recherche sur les procédés de fabrication. Pour étudier la déformation des matériaux et son

impact sur la microstructure, elle se place à l'échelle intermédiaire entre le moyen standard en laboratoire (Gleeble par exemple, échelle du cm^3) et l'échelle industrielle. Elle constitue ainsi un point de passage très utile pour la validation des prévisions de microstructures par FEM.

Le premier exemple d'étude, menée avec ABS (Acciaierie Bertoli Safau, Italie), porte sur la refermeture de cavités de type retassures de coulée lors du laminage à chaud de barres. En l'occurrence, la presse fonctionne en mode étirage de barre, ce qui permet de simuler grâce au robot manipulateur de Vulcain les quarts réguliers de la gamme de laminage. L'étude est menée à l'échelle 1/10^{ème}. La gamme réelle (laminage) comme la gamme modèle (étirage) sont simulées numériquement par FEM (Forge NxT), d'abord sous l'hypothèse d'un milieu continu. Leur similitude est vérifiée en termes de triaxialité des contraintes (ou d'intégrale de la triaxialité sur le chemin matériel).

L'étude expérimentale des cavités commence par la production de pores contrôlés en fonderie. Puis un barreau contenant un tel pore est usiné et inséré au centre d'une barre forée qui est alors comprimée à chaud sur la presse. La tomographie avant / après permet de suivre l'évolution de la forme et du volume de la cavité.

Parallèlement, une simulation est menée à l'échelle mésoscopique, sur une barre contenant la cavité mesurée, pour prédire l'évolution de son volume. Elle peut être l'objet de divers degrés de simplification, d'un simple lissage de sa surface interne de la cavité pour réduire le maillage, à sa substitution par un ellipsoïde « équivalent ». En cas d'auto-contact, la réouverture est autorisée, c'est-à-dire qu'on suppose une fermeture mais pas de cicatrisation. Le calcul montre alors qu'après un quart (rotation de 90°, donc changement de direction de déformation), les cavités amoindries lors de la passe précédente peuvent voir leur volume réaugmenter temporairement, du fait du changement de direction de compression ; mais au total chaque passe contribue bien à réduire le volume, du fait de la triaxialité globalement négative (compressive). L'étude montre des difficultés inhérentes aux pores de forme complexe, par exemple lorsqu'une cavité tortueuse se divise en plusieurs plus petites, ce qui pose des problèmes de maillage. Les perspectives sont de poursuivre la validation expérimentale de ce modèle « en champ complet », puis de passer au modèle « en champ moyen » pour prédire l'évolution d'une distribution de porosité.

L'exposé se termine sur l'évocation d'une autre étude, avec Aubert&Duval et l'Advanced Forming Research Centre (AFRC) de Glasgow, sur l'évolution de microstructure (fermeture de porosité, recristallisation) lors de la déformation à chaud de barres en 316L coulées en VIM/VAR (Vacuum Induction Melting / Vacuum Arc Remelting). La modélisation mécanique utilise une loi de comportement de Hill 1948 qui permet d'expliquer des comportements complexes lors du procédé.

Discussion

(DF) pose la question de la prédiction de la cicatrisation, au-delà de la fermeture géométrique. Le temps doit intervenir, via la diffusion, en plus de l'état de contrainte. Laurent Langlois (LL) approuve tout en précisant que l'étude de la cicatrisation n'a pas été menée. Le volume diminue avant tout par pincement de la périphérie dès le début de la compression, ce qui laisse du temps sous pression pour que la diffusion se produise. Il précise aussi que les retassures ne contiennent pratiquement pas de gaz, aucune pression ne s'oppose donc à la fermeture des pores, et le peu d'oxyde ne devrait pas gêner la cicatrisation.

(DF) peut-on traiter une base de données de résultats de tels modèles pour en faire des formules simples pour une préconisation en usine (appliquer des rapports d'élançement, h_{moy}/L , suffisamment petits pour être en forte compression etc.) ? (LL) la difficulté est que les quarts apportent un retard significatif à la baisse de volume, qui réaugmente même au début de la passe après quart. Il est donc difficile de tout ramener à un tout petit nombre d'indicateurs, comme il

serait nécessaire pour une utilisation pratique. (DF) rajoute un autre facteur, l'élargissement – toujours difficile à prédire précisément et qui joue fortement sur la refermeture.

(LL) souligne que tous les travaux à ce jour laissent de côté les interactions entre cavités. Il est difficile d'en quantifier l'importance. Mais on peut penser que des chapelets de petites cavités issues de la refermeture partielle d'une grosse cavité de forme complexe, doivent s'influencer mutuellement car elles sont nécessairement très proches.

(DL, DF) ce sujet pourrait faire l'objet d'un projet européen (type RFCS) et (PM) pourrait compléter un thème de journée scientifique comme « criques de laminage » : criques, pores, ouverture, propagation, fermeture...

(PM) quelles sont les modes d'utilisation et les difficultés rencontrées pour un tel équipement, relativement lourd, en milieu académique ? (LL) de la recherche amont autant que partenariale, peu de prestations, mais aussi l'enseignement. Des projets d'étudiants contribuent, outre à leur formation, à développer la plate-forme. De nouveaux procédés sont abordés, essentiellement liés aux mouvements permis par le robot (plus que les presses) : FSW, SPIF, meulage, soudage à l'arc... La robotique, le forgeage « agile » sont les sujets émergents.

Au titre des difficultés, les coûts de personnel (4 ingénieurs AMValor) et de maintenance, la lourdeur et les délais de financement de nouveaux développements (dossiers Région).

« Table ronde »

Quelle place pour un équipement de taille intermédiaire comme un laminoir pilote ?

- sachant que les laminoirs de production, de plus en plus équipés de systèmes de mesure très diversifiés¹, produisent des données en quantité et en qualité, sans crainte sur la représentativité des conditions ?

- et que d'autre part, la pression de l'appui technique se fait de plus en plus forte, laissant peu de temps pour la conception, la réalisation et l'analyse d'une campagne d'essais sur pilote. Quelle est la bonne échelle quand on se doit de répondre dans l'urgence ?

(Eliette Mathey [EM]) AMMz n'utilise plus son pilote à chaud qui n'apporterait rien par rapport aux informations issues de la production ; par contre le laminoir pilote à froid, construit pour la tribologie, optimisé et maintenu pour être représentatif des conditions tribologiques industrielles, tourne à plein régime.

(Alexis Gaillac [AG]) depuis la mise en service du nouveau laminoir à chaud de bande à Rugles, les capteurs produisent des bases de données qui permettent par exemple de compléter les lois rhéologiques, à partir de modèles simples. Le besoin de machines-pilotes se fait moins sentir.

(Jean-Michel Damasse [JMD], PM) il est cependant difficile d'explorer des points de fonctionnement différents sur une machine de production. Le pilote garde son intérêt pour explorer de nouvelles solutions de lubrification ou nuances à cylindres qu'il faut pousser dans leurs retranchements.

Par ailleurs, suivant les problématiques, la fréquence d'acquisition sur un train peut ne pas être suffisante. Celle d'un pilote est plus adaptable.

(DF) la bonne solution est à déterminer au cas par cas l'utilité des diverses solutions, entre mesure et IA, simulation numérique, essais de laboratoire ou pilotes à l'échelle 1 ou < 1 :

¹ cf compte-rendu de la conférence IOM3 « In-line Measurement, Déc. 2017, ou l'exposé de Florian ce jour

l'analyse du besoin sur le plan technique, le chiffrage des coûts sur le plan financier, orientent vers l'un ou l'autre.

Si l'échelle de taille plaide pour le pilote (coûts réduits), l'échelle de temps peut être problématique : difficile d'aborder des problématiques de dérive, d'usure sur un laminoir pilote.

(TS) oui, tous les types d'équipement ont leur intérêt, mais cela se heurte à la difficulté de les maintenir tous.

Constatant tout cela et sachant que le degré de similitude est un point critique, quels facteurs sont-ils les plus dangereux pour le recalage pilote / production ?

(JMD) le principal danger est que la facilité biaise l'analyse des besoins évoquée plus haut : « puisque cet outil (quel qu'il soit) est disponible, utilisons-le ». On en revient à l'importance cruciale d'une bonne analyse du problème posé.

(DF) avec la pression du temps, qui peut manquer pour réaliser cette analyse, à supposer que les compétences soient réunies.

(AV) d'expérience, deux autres facteurs :

- performance requise : des essais de laminage par émulsion se sont montrés bien corrélés avec les résultats d'une usine qui lamine « lentement ». Le même genre d'étude pour une autre usine, qui lamine à plus haute vitesse, a rencontré de sérieux problèmes de représentativité. (PM) Ne faut-il pas conclure que dans ce dernier cas, des problèmes de stabilité ou de mouillabilité peuvent résulter, par exemple, de températures plus hautes et qu'il devient alors plus difficile d'assurer la similitude de toutes les conditions critiques ?

- des problèmes comme l'usure ou les collages (là encore, la température peut être critique) demandent une accumulation de km laminés qu'un laminoir pilote a du mal à assurer.

(JMD, PM) certaines problématiques de scale up sont difficiles à anticiper : le changement pour une huile objectivement meilleure sur le plan de la lubrification, se heurta jadis au fait qu'elle provoquait un bouchage rapide des filtres... La réussite d'une opération de laminage dépend de tellement de facteurs qu'il est difficile de tout traiter sur un même outil. Même deux laminoirs nominalement identiques peuvent présenter des comportements différents.

Prochains thèmes (pour ~ Juin)

On a vu ci-dessus (ré)émerger deux sujets :

- laminabilité et criques, peut-être complété par la porosité, création et refermeture.
- la mesure thermique en conditions réelles (avec la SFT ?). Contributeurs possibles V. Duhoux pour Constellium, X pour AMMZ..., ABS ?

Par ailleurs, les sujets déjà listés auparavant :

- le chatter (vibration de la cage), ses conséquences, les remèdes : contributions possibles de Constellium et AMMZ, contacts à prendre.
- texture et anisotropie : contact préliminaire avec la CT du même nom, spécialisée dans la mesure (DRX, EBSD...), qui pourrait être complété par la CT « produits minces » (emboutissage), davantage « cliente ». Au Président de suivre le fil.
- mesure rugosimétrique in-situ : validation en continu de l'état de surface obtenu ? Quel type de mesure, topographique, optique (gloss) ?
- dressage (proposition de Florian Lyonnet)

On attend la concrétisation des contacts avant de fixer le thème qui pourra être abordé en Juin.