

Commission Thématique **LAMINAGE**

Réunion du 17 Juin 2021

Connexion Zoom

Thème de l'après-midi

Contrôle de la température en laminage à chaud ou à froid

Compte Rendu

Participants

Alexandre Barthelemy	(Constellium Voreppe)
Jean-Luc Borean	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Thierno Fall	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Didier Farrugia	(Tata Steel Europe)
Alexis Gaillac	(Framatome ANP, CR Ugine)
Didier Lawrjaniec	(Ascometal Hagondange, CREAS)
Julien Lebreton	(Framatome Rugles)
Camille Linardon	(Constellium)
Florian Lyonnet	(Framatome ANP, CR Ugine)
Elise Marchand	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Luca Marioni	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Eliette Mathey	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Nelson Mineiro Souto	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Pierre Montmitonnet	(MINES ParisTech, CEMEF)
Laurent Nguyen	(Constellium Voreppe)
Daniel Weisz-Patrault	(Ecole Polytechnique, LMS)
Béranger Protch	(Framatome ANP, CR Ugine)
Christian Salemi	(Framatome Rugles)
Noushin Torabian	(ArcelorMittal R&D Maizières)
Ariane Viat	(Constellium Voreppe)

Programme

- 13h30 – 14h15 *Jean-Luc Borean (ArcelorMittal)*
Hétérogénéités thermiques, du four à la bobineuse
- 14h15 – 14h45 *Thierno Fall et Nelson Mineiro Souto (ArcelorMittal)*
Work-roll thermal modeling - Features and Limitations
- 15h00 – 15h45 *Daniel Weisz-Patruault (Ecole Polytechnique, LMS)*
Refroidissement sur la Table de Sortie du Train à Bande à Chaud :
transitions de phase & contraintes résiduelles
- 15h45 – 16h15 *Pierre Montmitonnet (MINES Paris, CEMEF)*
Défaut de cambrage ("ski") en laminage à chaud :
étude numérique du rôle de la température
- 16h30 – 17h00 *Pierre Montmitonnet (MINES Paris, CEMEF)*
Analyse numérique du transfert thermique vis-à-vis de la lubrification
mixte en laminage à froid
- 17h30 – 18h00 table ronde – discussion : sujets des exposés et autres thèmes non traités :
- effets de la température sur la lubrification,
- effets sur le bombé cylindre et la planéité,
- effets sur microstructure métallurgique et propriétés mécaniques,
- hétérogénéité thermique, en four ou dans les attentes sur train,
points chauds et points froids et leurs conséquences...
- 18h30 – 18h00 Programmation des prochains travaux de la CT Laminage

Jean-Luc Borean a donc introduit le sujet par un tour d'horizon des problèmes liés à la thermique, de leur étude scientifique à forte base de modélisation et de leurs solutions technologiques tout au long d'un train à bande à chaud d'acier (TAB).

Les problèmes en question sont des défauts de surface, des défauts métallurgiques (phases obtenues en particulier) qui ont pour conséquences une insuffisance de caractéristiques mécaniques, des défauts de planéité ainsi que des défauts qui conditionnent la suite de la mise en forme : problème au décapage de l'oxyde, au laminage à froid, au recuit...

- une dissymétrie haut/bas peut s'installer dès la coulée continue et laisser des traces sur la carte thermique au TAB. Mais une origine majeure est le four de réchauffage : marques de longerons (refroidis → points froids), tête et pied plus chauds car soumis au rayonnement du four sur les faces extrêmes aussi, différence de température entre côté opérateur et moteur (position dans le four). L'étude numérique du chauffage en four de 5 brames permet de quantifier et expliquer la « bosse thermique » du profil transversal de température, pic de 5 à 20°C à ~100 mm des rives. Les grandes largeurs y sont particulièrement sensibles
- le défaut ne fait que s'aggraver lors du laminage à chaud, du fait de l'effet négatif de « l'ébullition de transition » : lors de l'arrosage, les zones les plus chaudes sont moins bien refroidies.
- il est sensible aux conditions d'edging (réduction de largeur) ; la réduction par presse à brames (« sizing press ») serait moins pénalisante.

Ces connaissances permettent d'imaginer et calibrer les remèdes : durée de chauffe plus longue en four bien sûr, mais c'est peu rentable économiquement ; distance entre brames dans le four, à réduire ; enfournement à chaud ; réchauffage sur le train (on utilise de capots de réchauffage de queue d'ébauche ; la solution coil box est difficile à maîtriser puisque, si elle diminue les marques de longeron et autre profil longitudinal, elle peut dégrader le profil transverse lorsque le débobinage n'est pas suffisamment rapide).

- les puissants jets d'eau du décalaminage, s'ils sont mal maîtrisés, peuvent refroidir excessivement la surface de la bande et faire dériver ses caractéristiques mécaniques. Par ailleurs, un gradient de refroidissement peut apparaître au droit du recouvrement des buses.
- l'analyse de bases de données industrielles de plusieurs usines montre que le train finisseur, bien réglé, a peu d'impact sur le profil transverse de température comparé aux fours, à la mise en largeur, aux arrosages et au refroidissement des bobines.
- mais tous les arrosages jouent. Il faut préférer le régime d'ébullition nucléée et éviter si possible le régime de transition. Or la température de surface de bande, qui décide lequel des trois régimes s'établit, est imposée par d'autres considérations, telle que la température de bobinage. On subit alors les hétérogénéités. Mais le bon côté des arrosages est qu'ils peuvent compenser les défauts préexistants par des systèmes d'arrosage différentiel sur la largeur. La gestion des arrosages en rideau / en spray fait partie des solutions.
- Le refroidissement en parc à coil peut, du fait de cette hétérogénéité d'entrée, conduire à des problèmes de maîtrise des phases obtenues. Un paramètre comme la distance entre coils peut jouer, symétriquement à celle des brames dans le four ! La boucle est bouclée. Dans les cas de sensibilité extrême, des couvercles permettent un refroidissement mieux contrôlé.

Thierno Fall et **Nelson Mineiro Souto** réduisent la focale à la modélisation du profil de température du cylindre de travail, générateur du bombé thermique qui s'ajoute au bombé de rectification et au profil d'usure, la somme décidant du profil d'épaisseur de la tôle (bombé ou « crown » et « edge-drop » en rive). La modélisation doit permettre :

- l'optimisation des arrosages de refroidissement, qu'il soit classique ou de type « High Turbulence Roll Cooling » (la spécialité du CRM) ;
- la mise en œuvre du skin cooling (refroidissement superficiel de la bande en entrée de cage pour limiter le choc thermique sur la peau du cylindre) ;
- la réduction éventuelle de la pression d'arrosage, du débit d'eau, pour des raisons économiques ;
- l'optimisation de l'interaction avec la lubrification : suppression de l'arrosage de refroidissement du cylindre en entrée pour ne pas perturber l'Application Directe ou la Lubrification Flexible.

L'étude présentée consiste à comparer deux modèles, un calcul éléments finis thermoélastique instationnaire 3D (LAM3) et un calcul purement thermique Différences Finies 1D + temps. Ces modèles donnent accès à la fois aux temps courts (profil circonférentiel de température de peau du cylindres) et aux temps longs (à l'échelle de la campagne de laminage, succession de contacts avec la bande et de temps « oisifs » de refroidissement des cylindres). Le calcul éléments finis, 3D, permet par exemple de trancher entre deux propositions de la littérature : l'approximation du bombé en contraintes planes est plus fiable que celle en déformation plane. L'histoire thermique complexe est modélisée par 12 zones à Coefficient de Transfert variable dans le sens circonférentiel : impact de jet, ruissellement, contacts solide-solide, refroidissement à l'air... L'accord entre les deux modèles est très bon dans tous les cas, tant en profil circonférentiel (temps courts) que radial (temps courts et temps longs).

Les limitations sont, comme d'habitude, liées :

- aux coefficients de transfert (on sait des choses mais dans le détail, le lien entre ces valeurs et les réglages des buses reste incertain) ;
- aux coefficients de dilatation (pour l'objectif final, le bombé thermique cylindre) : les fournisseurs ne s'accordent pas entre eux pour une nuance donnée : mais dans quel intervalle a-t-on fait la mesure ?
- un cas particulièrement critique est celui des cylindres à frettes, la différence de dilatabilité entre cœur et peau peut jouer fortement – ainsi que les différences de conductivité thermique d'ailleurs. Les deux modèles peuvent en tenir compte (de même que de la présence de la couche d'oxyde sur les cylindres mais, bien plus mince que celle de la bande, elle aurait peu d'impact).
- Le flux transverse de chaleur dans le cœur du cylindre pose la question de la condition aux limites entre table et tourillon, qui peut donner un « W-shape effect » pour les bandes larges.

Daniel Weisz-Patrault montre ses solutions efficaces (i.e. rapides mais précises) pour la modélisation du refroidissement, des transitions de phases et des contraintes résiduelles sur la table de refroidissement du TAB, comme il l'avait fait naguère (réunion du 08/11/2019) pour le bobinage. C'est encore un problème à couplages thermomécaniques multiples. Ici la gageure provient des dimensions très anisotropes (100 m de longueur, 1 m de largeur, quelques mm d'épaisseur). Mais la fine épaisseur justifie une modélisation « coques », très efficace. L'analyse fine du problème permet de déterminer l'ordre des calculs : thermique

d'abord, la force motrice ; transformation de phase, principale source mécanique puisqu'on n'est plus dans une zone de déformation imposée ; enfin conséquences mécaniques, dilatation hétérogène, plasticité de transformation.

Du fait des flux de refroidissement très dominants en z (épaisseur), on privilégie une approche thermique 1D + temps (transformé en espace du fait de la stationnarité du procédé). Plusieurs lancers à plusieurs positions transverses se chargeront de l'hétérogénéité. Pour simplifier, si flambement il y a, le gauchissement n'est pas pris en compte dans les conditions aux limites thermiques.

Cela conduit à une carte thermique et métallurgique fonction de x (direction de laminage) comme de z et y, ce qui est nécessaire pour le calcul mécanique où les trois directions principales des tenseurs ne peuvent être découplées. Une carte de déformation imposée $\varepsilon(x,y,z)$ s'ensuit et le calcul mécanique va la transformer en élasticité, dilatation, plasticité de transformation de phases. En sortie du calcul, on obtient les contraintes résiduelles puis leurs conséquences, les défauts de planéité. Sont essentiellement pris en compte les défauts développables, cintre (flexion en sens long) et tuile (flexion sens travers). En effet, les flexions dues à un gradient de température face inférieure / face supérieure (réglage des arrosages inf et sup) dominant par rapport à l'instabilité élastique qui conduirait à des défauts non développables comme les bords ou centres longs.

Une évolution du modèle, sans incidence sur sa structure a priori, serait de prendre en compte les conditions hétérogènes de température et d'efficacité du refroidissement détaillées par J.-L. Borean. A l'inverse, pour de fortes épaisseurs de bande en sortie, il n'est pas certain que l'on puisse toujours négliger les flux transverses et longitudinaux par rapport à ceux dans l'épaisseur.

En perspective, ce modèle thermomécanique de table de sortie pourrait fournir les données d'entrée nécessaires aux modèles de bobinage pour former une plate-forme de calcul post emprises.

Pierre Montmitonnet a frappé deux fois. Un premier exposé a porté sur les causes du violent cintrage d'une plaque de faible longueur lors du laminage de larges d'alliages de Zr à Rugles ; probablement thermiques, elles mettraient en œuvre une dissymétrie de température haut / bas. Ce problème semble être toujours d'actualité sur le « vieux » laminoir à chaud de Rugles, sachant qu'un nouveau est en cours de mise en route. Il apparaît en cours de séquence de premier laminage à chaud, puis s'atténue lors des dernières passes - si on a réussi à « ré-embecqueter » la brame en V pour la passe suivante. L'enquête numérique a montré que les causes habituellement mentionnées pour le « laminage asymétrique », diamètre ou vitesse différents des cylindres, frottement différent en faces inf et sup, étaient trop insignifiantes pour pouvoir être mises en cause ici. La hauteur de la ligne de passe par rapport aux tables à rouleaux d'entrée et de sortie est d'habitude une cause potentiellement importante ; mais, les tables étant fixes ici, l'étude l'a mise hors de cause dans ce cas particulier. In fine, c'est une différence de température entre haut et bas qui a été pointée du doigt, démultipliée par la forte sensibilité de la rhéologie à la température dans la zone de transus β . Il faut qu'elle soit assez haute, entre 50°C et 100°C, mais des mesures – certes délicates - ont montré la possibilité de tels écarts. La séquence d'évènement suivante a alors été échafaudée :

- la température initiale est homogène (chauffage en bain de sel, larget sur la tranche) ;
- mais le problème est apparu après une grande maintenance avec changement des rouleaux des tables, allant dans le sens d'une meilleure conservation de la chaleur : de ce fait, les conditions aux limites seraient devenues fortement asymétriques,

privilégiant de plus hautes températures en face inférieure, soit un métal plus mou, plus facilement allongeable ;

- cela explique qu'il faut quelques passes pour que se développe la différence de température qui conduit à la flexion en V ;
- ensuite le larget devient plus mince, ce qui permettrait automatiquement l'homogénéisation de sa température, expliquant que le problème s'atténue.

Cette étude a mis l'accent sur ces gradients de température et l'importance de bien mesurer celle-ci – et comme le montre ce cas particulier, en face inférieure comme en face supérieure, ce qui n'est pas forcément simple... la correction de ces températures en cas de mesure d'écart ne le serait pas plus, dans la mesure ou par exemple un temps d'attente ne ferait qu'aggraver la situation.

Le deuxième sujet abordé est celui de l'interaction entre le refroidissement et la lubrification, sous le seul angle de l'impact de la température des cylindres sur la formation d'un film lubrifiant. C'est là aussi essentiellement une étude théorique et numérique, utilisant le modèle de laminage lubrifié de Marsaut (1998) et un module de calcul volumes finis de température de cylindre et de bande, avec les multiples zones évoquées plus haut. L'étude a été appliquée à un tandem 5 cages lubrifié en Application Directe (DA). Rappelons que la DA consiste à ne pas recycler une émulsion riche et instable, l'arrosage se faisant ~1 m en amont de l'emprise pour jouer sur le temps de « plate-out » (démixtion de l'émulsion au contact de la bande). La complexité du train n'a pas découragé les hardis modélisateurs malgré une bonne dizaine d'arrosages successifs (cylindres et bande, face sup / face inf) et malgré la complexité du modèle lui-même qui, outre les habituelles caractéristiques géométriques et propriétés mécaniques et thermiques des cylindres et de la bande, demandent celles de leurs rugosités de surface et celles du lubrifiant. Vu l'incertitude sur bon nombre de ces propriétés, c'est essentiellement un plan d'expérience paramétrique semi-quantitatif qui a été conduit. Parmi les paramètres étudiés, le coefficient de transfert thermique au contact bande-cylindre s'est révélé peu impactant du fait des temps de contact extrêmement courts (grande vitesse de laminage, très faibles longueurs de contact pour une bande fine). La température du « coolant » et, dans une moindre mesure, l'efficacité des buses, ont plus d'effet. Quoi qu'il en soit, dans ces conditions particulières, les variables tribologiques ont été peu influencées et in fine, le coefficient de frottement et par lui les efforts de laminage ou le glissement en avant se sont montrés peu sensibles. Ce résultat contredit des mesures publiées par Bluescope qui montraient une variation immédiate et significative du glissement en avant lors de changements des conditions d'arrosage ; on considèrera donc prudemment que les influences – ou absences d'influences - évoquées ci-dessus sont un effet des conditions particulières de ce laminage fer blanc.

Complétons par deux points extraits de la discussion générale de synthèse :

- A. Viat a posé la question des coefficients de transfert pour des arrosages de lubrification à l'huile entière. L'assistance n'avait pas connaissance de données publiées. Peut-être en existe-t-il dans d'autres domaines qui restent à définir ; il y en a à coup sûr pour la trempe à l'huile des aciers mais les domaines de ΔT ne correspondent pas, évidemment.
- A. Barthémely, à propos des modèles thermo-mécano-métallurgiques, a souhaité élargir le débat aux transformations de type recristallisation, très présentes dans les

alliages légers. Il nous a semblé que les modèles de prévision de type Avrami (ou, en version moderne, JMAK comme Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov) sont régulièrement utilisés couplés aux modèles de forgeage ou laminage et qu'ils donnent accès aux hétérogénéités métallurgiques en réponse aux histoires spatialement variables de la mécanique et de la thermique. Des modèles plus locaux (en champ complet, investiguant l'échelle du grain et les effets de voisinage) peuvent aussi être utilisés mais plus difficilement en mode couplé pour l'instant.

Tout cela étant dit et commenté, il ne nous restait plus qu'à fixer le thème de la prochaine journée. La prévision précédente a été validée, à savoir

Essais mécaniques et/ou tribologiques en conditions réalistes

La difficulté d'atteindre, dans des essais de laboratoire, de grandes vitesses et grandes déformations, des états de contrainte et de déformation proches du procédé réel rendent tentant d'utiliser les méthodologies inverses, à partir de laminage pilote voire industriel, pour remonter à des données thermomécaniques et tribologiques pertinentes. Les mesures nécessaires, l'indispensable modélisation, et par là les possibilités et limites de telles approches seront à l'ordre du jour.

L'assistance a peu de compétence profonde sur ce thème mais Didier Farrugia et Daniel Weisz-Patrault se sont proposés pour compléter l'action de Pierre Montmitonnet pour « recruter » quelques spécialistes. Si l'action se révèle fructueuse, une demi-journée comme celle décrite ici pourra se tenir, à une date à préciser, en Septembre ou Octobre. On essayera d'accoler des exposés exprimant les besoins du lamineur avec des lectures de spécialistes des mesures mécaniques et tribologiques haute vitesse de déformation ou de glissement / hautes températures / grandes déformations, si possible les 3 en même temps...