**Commission Thématique LAMINAGE**

**-----------------------**

**Réunion du 8 Novembre 2019**

*Connexion Skype Entreprise*

**----------------------------**

**Compte Rendu**

**« Présents »:**

A. Barthelemy (Constellium – C-TEC, Voreppe)

E. Boatti (ArcelorMittal R&D Maizières)

E. Mathey (ArcelorMittal R&D Maizières)

A. Gaillac (Framatome)

D. Lawrjaniec (Asco Industries),

P. Montmitonnet (MINES ParisTech, CEMEF),

T. Sourisseau (Ugitec)

D. Weisz-Patrault (Ecole Polytechnique, LMS)

Remarques

* P. Royes (APERAM Isbergues), malade, s’étant excusé, la matinée « bobinage » s’est trouvée réduite à 2 exposés – et leurs discussions approfondies.
* Par suite d’une grève SNCF, cette réunion initialement prévue à ArcelorMittal Saint-Denis avec ouverture d’une connexion extérieure s’est transformée en une pure réunion Internet entre les 8 participants (6 l’après-midi), qui s’est d’ailleurs très bien passée.

**Matinée (10h-12h30) : exposés sur les défauts et la modélisation du bobinage**

Elisa BOATTI (ArcelorMittal R&D Maizières) : Coil defects and mechanisms in the hot plant

Daniel WEISZ-PATRAULT (X-LMS) : residual stress,coiling process and run out table

On note que les deux exposés se concentrent sur le laminage à chaud, là où les problèmes rencontrés sont les plus graves. Cela ne veut pas dire que bobiner à froid est anodin.

1 - Elisa BOATTI : Coil defects and mechanisms in the hot steel plant

Plusieurs types d’incidents se produisent en atelier. Ils sont rares mais souvent graves pour l’outil de production et parfois pour les opérateurs. Leur fréquence risque d’augmenter parce qu’au fil des années, le métal durcit et les bandes s’affinent. Il est donc important de les comprendre et de les modéliser pour faire face à ces risques accrus.

L’exposé passe en revue les principaux types de défauts de bobinage

* Affaissement (coil sagging), écrasement de la bobine par son propre poids.
* despirage interne (loose inner winding), perte de compacité intéressant seulement l’intérieur de la bobine, c’est-à-dire les premières spires enroulées
* « coil springback » où une perte locale de compacité se répand dans toute la bobine
* télescope, qui se caractérise par un glissement latéral de certaines spires, donnant à la bobine l’aspect d’une baguette télescopique.

Dans tous les cas, la mauvaise tenue de la bobine est associée à une perte de tension, c’est-à-dire de pression de contact entre spires, donc de contrainte de frottement : les spires ont la possibilité de glisser les unes par rapport aux autres, de se desserrer. Les paramètres majeurs identifiés sont :

* coil sagging : outre les incidents de manipulation ou une tension de bobinage insuffisante, le support est important : une bobine posée sur le sol, avec une force de réaction verticale en un point unique, a plus de risques de s’affaisser qu’une autre posée sur un berceau avec deux points de chargement et deux forces de réaction convergentes pointant vers le centre de la bobine. On rencontre le problème davantage sur les bandes fines et larges, et d’autant plus en présence de défauts de planéité qui empêchent la pression de bien se répartir entre deux spires. Les produits durs sont les plus à risque, d’où la prévalence croissante des problèmes (AHSS). Enfin, la non-uniformité de la température est un facteur aggravant, en particulier le refroidissement au contact du mandrin en surface interne.
* le télescope semble plus directement lié des défauts de réglage entraînant une dissymétrie opérateur/moteur, que ce soit de la tension de bobinage, d’alignement des rouleaux pinceurs, ou des défauts de profil/planéité en tête de bobine témoignant d’un pré-réglage insuffisant avant que les automatismes ne corrigent les défauts.
* coil springback : contrairement au coil sagging, ce sont plutôt les tôles épaisses qui sont critiques, du fait de la difficulté de leur imposer de fortes tensions pour les garder fléchies; par contre les alliages durs sont là aussi les plus à risque. Ce défaut qui peut survenir après le cerclage de la bobine, sous forme d’une véritable « explosion », est particulièrement dangereux.

Une caractéristique importante est que ces défauts peuvent survenir dès le bobinage ou la sortie de la bobine de la bobineuse, mais aussi plus tard, dans les heures qui suivent, alors que se poursuit le refroidissement et éventuellement les transformations de phases qui changent la masse volumique et redistribuent par conséquent les pressions et tensions au sein de la bobine.

L’exposé se conclut sur un tour d’horizon des modélisations possibles, avec un focus sur deux approches : les modèles spire à spire, qu’ils soient analytiques ou numériques, très coûteux du fait du grand nombre d’objets en contact à considérer ; et les modèles « homogénéisés » dans lesquels on vient lier une spire unique à un ensemble de spires (internes, déjà bobinées) considéré comme un bloc compact avec des propriétés moyennées, éventuellement anisotrope pour tenir compte de la raideur plus faible dans le sens normal (contact entre rugosités). La difficulté est d’autant plus grande qu’une partie des problèmes pratiques demande des modèles 3D, sans aucune symétrie (importance de la force de gravitation), et qu’il faut intégrer transfert thermique en milieu hétérogène (bourré d’interfaces), transformation de phase austénite – ferrite, un métal chaud au comportement complexe (fluage), des spires qui peuvent présenter des défauts de planéité latents ou manifestes, induisant des hétérogénéités de tension et pression, et une problématique fondamentalement reliée au contact et au frottement (entre spires), régi par des inéquations dont on sait que ce n’est pas le plus facile à traiter en mécanique.

Éléments complémentaires tirés de la discussion :

* pour les alliages légers, Alexandre Barthelemy souligne l’impact des problèmes de bobinage à chaud qui sont peu ou prou les mêmes, mais avec une prévalence très variable selon les usines, leurs équipements, leurs compétences. Un facteur de risque de moins pour l’aluminium est l’absence de transformation de phases.
* À froid, des problèmes similaires existent (affaissement, flambements divers, locaux en cœur de bobine ou généralisés) ; A. Barthelemy souligne cependant que les défauts sont moins fréquents (le moteur thermique/dilatation n’est plus là).
* On pourrait utiliser des viroles internes pour « soutenir » le cœur de la bobine, mais c’est un coût supplémentaire ; on le fait lorsqu’on y est obligé (exemple du laminage de feuille mince : virole en carton).
* Difficulté de résoudre des problèmes posés par de nouvelles nuances plus exigeantes dans des installations anciennes, figées, à quelques améliorations près. Il faut donc trouver des « rustines » pour remédier à des conceptions qui peuvent être devenues inadaptées aux produits modernes. La modélisation peut y aider. On pourrait d’ailleurs tenir des propos similaires pour d’autres parties de l’équipement des laminoirs.
* Le frottement est une des clés du problème, plus particulièrement via le glissement commençant et le coefficient de frottement statique. Des études expérimentales ont été tentées mais il est particulièrement difficile de faire les mesures dans des conditions proches de celles du bobinage à chaud. On peut imaginer visualiser directement le glissement entre spires par marquage du bord de la bobine, mais c’est surtout in situ que ce serait utile, or c’est là que c’est le plus difficile à envisager. De même des mesures de rigidité normale (qui gouverne la relation pression-tension entre spires) peinent à donner des résultats probants.

2 - Daniel WEISZ-PATRAULT: residual stress,coiling process and run out table

Daniel présente les modèles de bobinage, de transformation de phases et de développement des contraintes résiduelles qu’il a développés ces dernières années, tout en soulignant l’impossibilité de construire un modèle « universel » : il faut donc analyser chaque problème étudié, en déduire les causes et les facteurs importants et consacrer l’effort à la réalisation d’un modèle le plus efficace possible (rapport précision/coût CPU) capable de prendre en compte ces facteurs-là. Une approche « modulaire » semi-analytique est ainsi présentée :

* modèle de flexion élastoplastique en arc de cercle de la spire courante et de mise en contact avec le reste de la bobine (qu’il soit traité en spire à spire, élastoplastique, ou homogénéisé, élastique). Il permet de calculer la distribution de contrainte et de voir par exemple si la contrainte radiale reste compressive après retrait du mandrin – ou pas, et alors un despirage interne est à craindre. Le modèle montre aussi l’importance du défaut de profil (surépaisseur au centre de la bande) qui concentre la contrainte radiale au centre et laisse les rives trop peu comprimées dans la bobine.
* Après le modèle purement mécanique, on passe au couplage thermique. Les modèles sont axisymétriques, à température homogène (T constante) ou variable (T(r) en 2D, T(r,z) en 3D). Il faut prendre en compte la résistance thermique de contact entre spires, qui en fait un milieu thermiquement hétérogène, traité en insérant entre deux spires une lame d’air équivalente qui ralentit la diffusion de la chaleur. On ajoute la chaleur latente provenant de la transformation de phase, pour laquelle des modèles de complexité variée peuvent être utilisés, indifféremment. Une première version de type Avrami est présentée qui permet de prédire les phases formées lors du refroidissement. Puis, pour l’estimation des contraintes résiduelles, l’indispensable plasticité de transformation est intégrée. Le refroidissement est alors traité comme un problème axisymétrique T(r,z) avec des rives adiabatiques et des surfaces internes et externes ou s’échange le flux avec l’extérieur (l’impact de cette simplification a été débattu). On trouve en fin de compte des différences de taux de transformation (et de phases présentes) entre le cœur de la bobine et les rives. Le modèle avec plasticité de transformation permet en plus de calculer les contraintes résiduelles dans chaque spire – avec le gradient dans l’épaisseur de chacune.
* Un dernier modèle a trait à l’affaissement. Compte tenu du caractère non axisymétrique en particulier, l’approche simplifiée du modèle homogénéisé – mais anisotrope axial-radial - est utilisée. Il fait donc de la mécanique des milieux continus, représentant le glissement entre spires comme un cisaillement au sein du milieu continu. La minimisation de l’énergie totale va équilibrer selon un principe mécaniquement sain l’énergie de glissement et l’énergie de déformation élastique. Un exemple est montré d’affaissement massif, avec la distribution de glissement et les contraintes associées.

Au total, ce second exposé répond à bon nombre des questions du premier, tout en soulignant la capacité de construire des modèles manipulables dans l’industrie, le coût étant reporté sur la modélisation (au sens de la construction intellectuelle et la programmation du modèle).

**Après-midi (13h30-15h30) : discussion sur la structure et le fonctionnement de la CT laminage. Vers une feuille de route à 5 ans.**

1. Selon une évolution entamée mais non formalisée, la participation limitée des débuts de la CT (« club » de personnalités académiques et industrielles) est étendue à toute personne francophone intéressée par les travaux de la CT. Le principe de la formation d’un Bureau de 4 à 8 personnes, celles qui sont régulièrement actives, est accepté. L’étape suivante est (i) de formaliser cette décision, (ii) puisque les travaux sont ouverts à tous, de se mettre en capacité d’attirer le maximum de participants et d’auditeurs. Plutôt que de vastes mailings, il est proposé de travailler chacun à l’aide de nos réseaux en espérant de proche en proche un effet « tache d’huile ».
2. La page web de la CT sur le site web SF2M devient donc le point de ralliement d’où seront diffusées les annonces de réunions, exposés, conférences… C’est pourquoi il faut que cette page fournisse des services appréciés. Il est par exemple suggéré d’y mettre des liens vers des articles ou ouvrages majeurs, de lister des experts susceptibles d’apporter des conseils (avec leur accord bien sûr), liste d’items non exhaustive qui s’enrichira au fur et à mesure de nos réflexions.
3. Formation initiale ou continue : des besoins existent sporadiquement mais concernent trop peu de personnes, essentiellement du côté des produits longs (les entreprises du « plat » ont leur propre système de formation). Il paraît donc risqué de se lancer dans une organisation *ab initio*. Par contre, il est suggéré d’introduire dans les journées thématiques comme celle d’aujourd’hui des exposés pédagogiques sur des points un peu plus larges, à la fois donnant les bases pour comprendre ce qui suit et offrant un complément de formation générale aux embauchés récents par exemple.
4. Extension / modification du contour thématique de la CT Laminage: la réflexion autour d’une fusion laminage / emboutissage étant au point mort, la remarque est faite que le forgeage affronte des problématiques peu différentes du laminage. La SF2M n’ayant pas de CT Forgeage, il n’y a pas de concurrence interne. Par la méthode du bouche-à-oreille mentionnée ci-dessus, il est donc suggéré d’inviter des personnalités du monde de la forge ; la « cellule forge » du CETIM pourrait être incitée à servir de point de contact. Nous nous rapprocherions d’ailleurs du périmètre de groupes similaires dans les sociétés sœurs européennes.
5. Relations extérieures, contacts : nous passons rapidement en revue les activités plus ou moins fournies de l’AIM en Italie, de l’IOM3 au Royaume Uni (avec lequel des relations existent), en soulignant l’intérêt d’organiser en commun des évènements pour lesquels l’échelle nationale, on l’a vu, est clairement trop petite.
6. De la même façon, nous abordons les possibilités de relation avec les sociétés savantes françaises complémentaires. Rappelons qu’il y a eu des Journées organisées avec la SFT (Société Française des Thermiciens). On peut bien sûr penser au GST 12 « Tribologie » de l’AFM. Toujours à l’AFM, des relations avec Mecamat ou avec le groupe « Formage Virtuel », dont plusieurs mots-clés recouvrent nos préoccupations, seraient positives.
7. Avec les autres CT de la SF2M, la séquence Coulée – Laminage – Emboutissage est un exemple évident de complémentarité ; Transformations de phase ou Revêtements correspondent à des sujets importants pour nous ; de manière plus lointaine, Matériaux Architecturés ou Matériau Numérique offrent des centres d’intérêt communs. Et bien sûr, on ne peut se désintéresser de la Texture lorsqu’on est lamineur.
8. Pour finir, on réfléchit en commun sur des thèmes de journées d’échange scientifique, éventuellement communes avec d’autres groupes. Quelques propositions :

* Pourquoi pas le bobinage, qui pourrait intéresser le Bulk Metalforming Committee de l’IOM3 (cf les colloques spécialisés Oxides, Rolls…) ; sur un plan plus académique, possibilité d’alimenter le débat avec la similitude entre bobinage de tôles métalliques minces et bobinage du papier (problèmes de flambement) ?
* Tribologie du laminage, thème plus ciblé à définir (avec le GST 12 de l’AFM, pourquoi pas) ; peut être étendu au forgeage en initiant le rapprochement avec ce monde-là ;
* Modélisation du laminage, ou chaînage coulée – laminage – emboutissage avec le groupe Formage Virtuel de l’AFM, qui réfléchit sur des aspects plus amont de la modélisation, et nos CT correspondantes, qui sont plus dans l’application ;
* Point sur la disponibilité d’installations « pilotes » au service de la mise en forme des métaux. Outre les pilotes de procédés sont évoqués les techniques de caractérisation en conditions réalistes du comportement en déformation (on parle de Gleeble) ou en frottement ;
* Planéité, rectitude, planage et dressage.