

Introduction

L'objectif principal du laminage est l'obtention des tôles avec des dimensions spécifiées, dans le but d'une utilisation ultérieure. Il existe deux types de laminage: le laminage à chaud et le laminage à froid. Le laminage à chaud est utilisé pour l'obtention des tôles fortes et des brames, qui sont après utilisées comme matière prime pour l'obtention des tôles minces d'acier laminées à froid.

Le laminage à froid est utilisée pour obtenir des tôles minces d'acier et d'aluminium, en déterminant la croissance de leur qualités. La surface de la tôle devient plus fine que dans le cas du laminage à chaud, et à cause du phénomène d'écrouissage croit la résistance à la rupture de la bande. L'épaisseur des tôles minces peut être réalisée avec une grande précision en satisfaisant la demande du client, les écartements d'épaisseur en étant plus petites que celles de la matière prime avant le laminage. Les tôles minces sont celles avec la plus grande valeur ajoutée, à cause de ses qualités mécaniques et dimensionaux supérieures.

Le but de ce projet est l'étude des possibilités d'amélioration de la qualité des tôles minces d'acier par une analyse des méthodes de réglage de l'épaisseur des tôles pour les laminoirs spécialisés dans ce type de production, dans le but de la diversification de l'offre des produits et de maintenir la compétitivité sur le marché interne et international.

Sommaire

Chapitre 1 – Mémoire justificatif	10
1.1 Considérations générales sur le laminage à froid.....	10
1.2 Des modèles adaptifs pour les laminoirs à froid.....	12
1.3 Sous-modèles des plans des passes.....	14
1.4 Sous-modèle de pré-positionnement.....	16
1.5 Composants clés du modèle de pré-positionnement.....	18
Chapitre 2 – Le modèle mathématique général du processus de laminage à froid	23
2.1 Introduction.....	23
2.2 La géométrie.....	25
2.3 L'équation d'équilibre.....	25
2.4 La force de frottement.....	27
2.5 Les conditions limite.....	27
2.6 La résolution approximative d'équation de laminage.....	27
2.7 La résolution exacte d'équation de laminage.....	29
2.8 Le retour élastique de la bande.....	30
2.9 Les forces de laminage.....	32
2.10 Le module de plasticité de la bande.....	33
2.11 La déformation des cylindres.....	33
Chapitre 3 – Description du logiciel LAMIN	34
3.1 Introduction.....	34
3.2 Description générale.....	34
3.3 Les étapes nécessaires pour faire une estimation.....	35
Chapitre 4 – Mémoire de calcul	41
4.1 La simulation numérique du procès de laminage en utilisant les données acquisitionnés du procès pour le réglage de l'épaisseur à un laminoir quarto réversible.....	41
4.2 Le calcul du moment d'inertie J et de la puissance du moteur principal.....	51

Chapitre 5 – Commande sequentielle du processus de laminage à froid des tôles d’acier.....	58
5.1 Introduction.....	58
5.2 Le laminage à froid vu comme procès conduit.....	62
5.3 Le modèle predictif pour la force de déformation plastique avec l’aide d’une base des données expérimentale (Data base model).....	63
Chapitre 6 – La simulation du processus de laminage.....	66
Chapitre 7 – L’analyse économique des moyens de régulation proposés.....	75
Chapitre 8 – La technique de la sécurité du travail et la fiabilité des laminoirs quarto réversibles.....	76
8.1 Normes de la technique de la sécurité du travail dans les installations électriques métallurgiques.....	76
8.2 La fiabilité.....	76
Chapitre 9 – Conclusions.....	78
Bibliographie.....	79

CHAPITRE 1

Mémoire justificatif

1.1 Considérations générales sur le laminage à froid

Les bandes d'acier laminées à froid sont produits sous la forme des rouleaux en mode traditionnel par les laminoirs tandem avec 4 jusqu'à 6 cages ayant une capacité de production équivalente avec 2 millions tonnes par an. En présent on constate une croissance importante de la production des bandes minces d'acier et d'aluminium laminées avec des cages quarto réversibles des petites dimensions.

Le problème essentiel de la production est lié de la microstructure d'acier qui s'obtient pendant le procès de laminage et les performances liées à la précision dimensionnelle du produit finit. La matière prime de laquelle les bandes laminés à froid sont obtenues provient par le laminage à chaud des brames. Par le laminage à froid la qualité des bandes obtenues croit considérablement en principalement selon trois composantes:

- La qualité de la surface de la bande: par le laminage à froid la surface devient plus fine en rapport avec la surface de la bande laminée à chaud;

- Les qualités mécaniques: pendant le laminage à froid à cause du phénomène d'écroutissage croit la résistance à la rupture de la bande;

- Les tolérances dimensionaux: les écartements d'épaisseur de la bande laminée à froid sont plus petites que celles de la matière prime avant le laminage. Aussi la variation de l'épaisseur sur la longueur totale du rouleau peut rester constante par le processus de laminage à froid.

En conséquence par le processus de laminage à froid on obtient des produits avec des qualités mécaniques et dimensionaux supérieures.

Les étapes les plus importantes du processus de laminage sont:

Premièrement on fait l'éloignement des dépôts d'oxides de la surface de la bande dans l'opération de décapage. Après ça on applique un filtre d'huile sur la surface décapée qui diminuera le procès d'oxidation et améliorera le procès de laminage à froid, suivi par le procès de laminage à froid par la réalisation des passes succesifs de la bande par la cage quarto avec le but d'obtenir l'épaisseur finale désirée et pour l'amélioration de la résistance à

la rupture et de la dureté de la bande d'acier.

La dernière phase est constituée par le dressage, procès de laminage avec la réduction insignifiante de l'épaisseur (2%) qui modifie la structure du réseau cristallin du métal dans le sens d'addition des qualités mécaniques et l'amélioration de la planéité de la bande. Il peut être mentionné le fait que le procès de laminage à froid est adapté à les besoins qualitatifs imposés par le client qui achète la bande et en conséquence la destination du produit fini doit être connue.

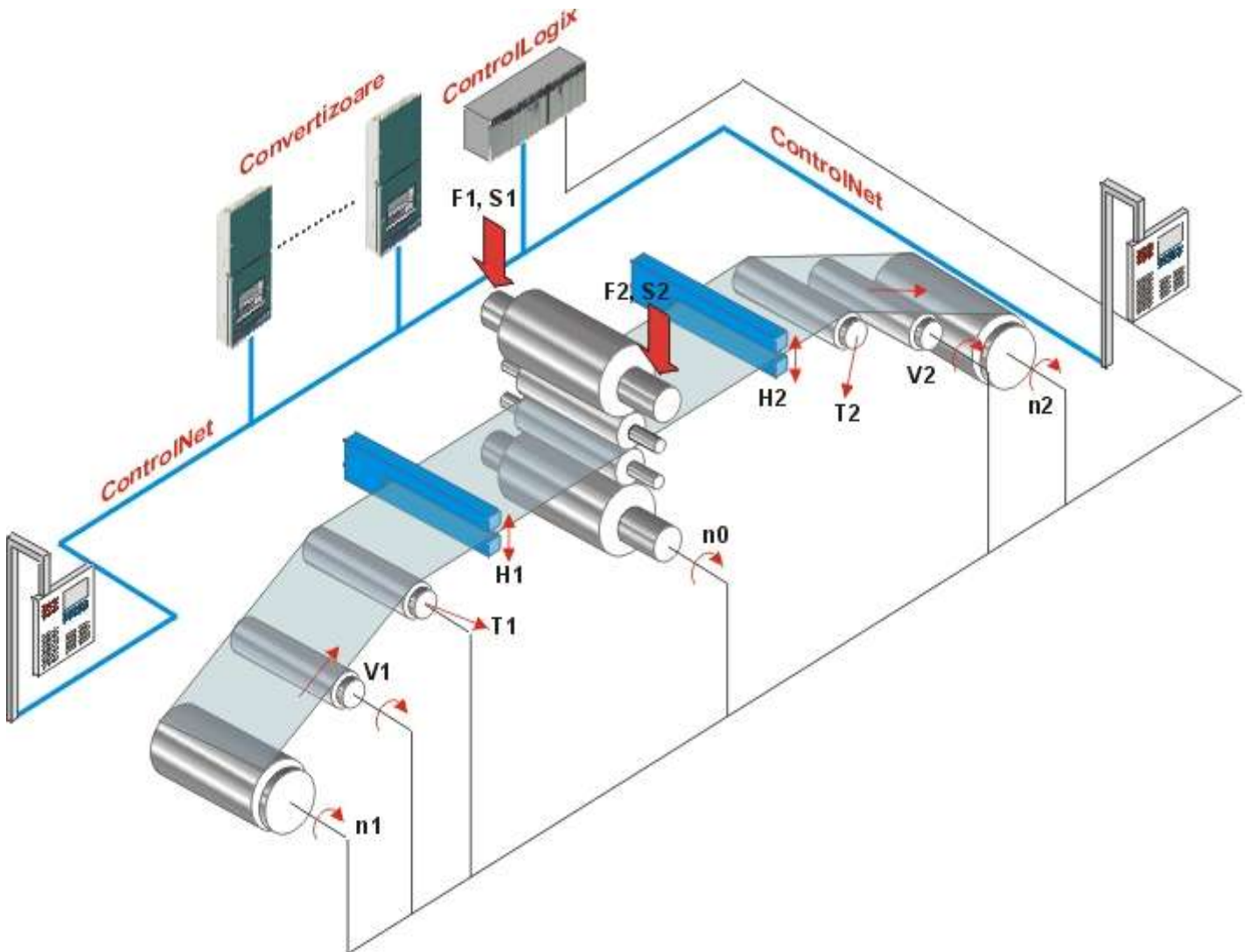


Fig. 1 Schéma cinématique du laminoir quarto réversible

Les systèmes d'automatisation pour les laminoirs des bandes à froid doivent satisfaire les exigences majeures suivantes:

-La précision de positionnement des cylindres de laminage (qui ont une masse de dizaine de tonnes) est d'ordre d'un μm , dans les conditions dans lesquelles les forces de laminage peuvent atteindre l'ordre des milliers de KdaN;

- L'épaisseur finale de la bande peut varier entre 2 mm et 0.07 mm;
- La tolérance d'épaisseur de la bande peut atteindre pour la bande de 0.07 mm $\pm 1 \mu\text{m}$;
- Le contrôle et la synchronisation d'un grand nombre des mécanismes avec réglage en position ou vitesse dans le domaine 400-2500 m/min et accélérations de 100-400 m/min/sec et boucles multiples interconnectés avec une période d'échantillon de 2 ms jusqu'à 20 ms;
- Instrumentation avancée de mesure pour la vitesse linéaire, l'épaisseur et la planéité de la bande et pour la tension en bande.

1.2 Des modèles adaptifs pour les laminoirs à froid

Le laminage à froid est une étape importante de la fabrication des tôles métalliques. Au cours du procédé, le métal est écrasé par passages successifs entre des cylindres jusqu'à obtenir l'épaisseur et les propriétés désirées.

Pour rester compétitifs, les lamineurs cherchent en permanence à maintenir et à accroître la qualité de leurs produits, la productivité et la flexibilité de l'outillage industriel. Pour ce faire, il leur faut parfaitement comprendre et maîtriser toutes les étapes du procédé.

Pour améliorer la qualité des produits laminés, les efforts portent sur la réduction des tolérances d'épaisseur et de planéité, de même que sur l'amélioration de l'état de surface. En même temps, la flexibilité du laminoir doit être renforcée pour satisfaire une demande accrue de produits diversifiés, alors qu'une productivité élevée est impérative pour rester compétitif dans une économie mondialisée.

L'automatisation des laminoirs permet de répondre à ces besoins. Elle s'appuie sur les éléments suivants:

- Un système fiable et moderne de conduite automatisée de la production;
- Des capteurs et actionneurs également fiables;
- Un modèle adaptif de réglage avec calcul des plans de passes et des pré-positionnements;
- Des automatismes avancés;
- Un système et une interface conviviale de visualisation, d'exploitation et de diagnostic.

Pour aider l'industriel à atteindre ses objectifs, un modèle mathématique calcule les plans de passes et les pré-positionnements du laminoir.

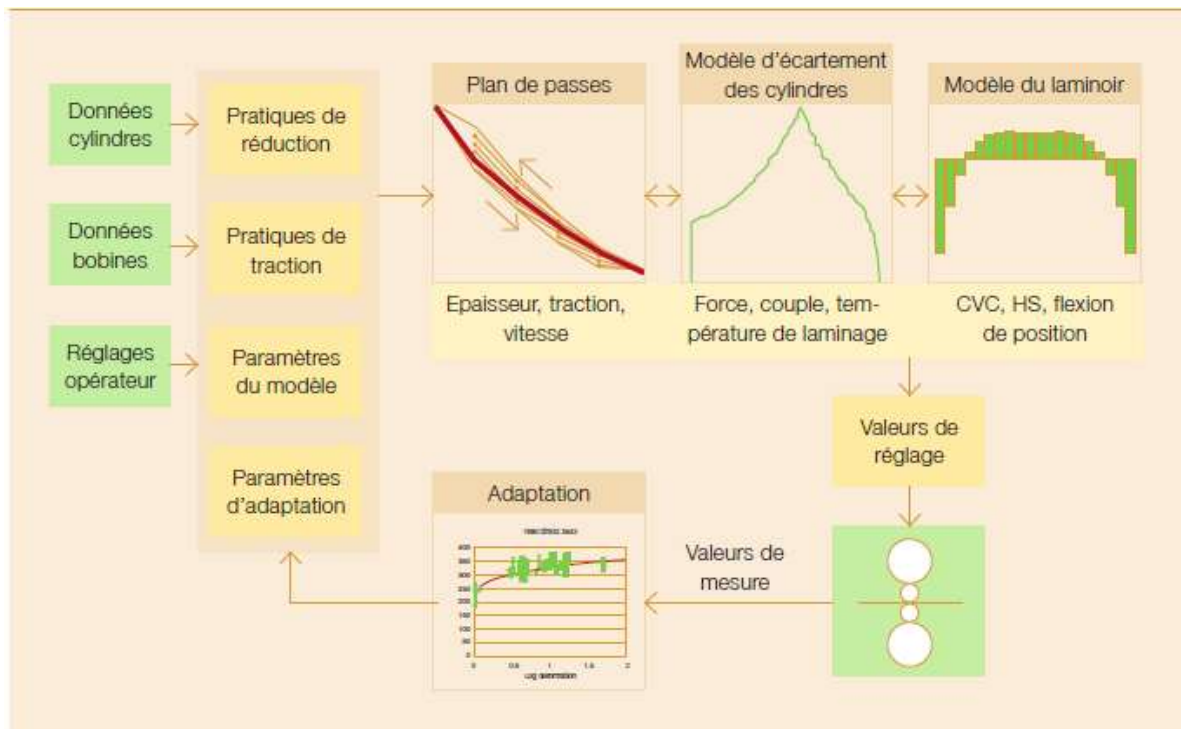


Fig. 2 Interaction des données et des fonctions au cours du procédé de laminage

A partir des données des bobines et des cylindres, le programme de production utilise des tables de valeurs de réduction et de traction élaborées à la fois à partir de l'expérience pratique du lamineur et de sous-modèles mathématiques pour prédire le comportement du procédé. Le modèle se compose essentiellement de 4 parties: la courbe d'écrouissage du matériau, le modèle de frottement des cylindres, le modèle d'écartement des cylindres (qui fournit la force de laminage, le couple d'entraînement, le glissement en avant et la température de la tôle laminée) et enfin, le modèle du laminoir (qui donne les valeurs de consigne pour les actionneurs de planéité et les positions d'écartement des cylindres).

Les valeurs de mesure sont collectées et filtrées au cours de chaque passe et ensuite comparées aux valeurs de prédiction correspondantes. Des paramètres adaptatifs sont calculés pour que les prédictions soient en accord avec les valeurs mesurées.

Le modèle de laminage fournit les valeurs de réglage appropriées à l'automatisme du niveau 1 de l'architecture d'automatisation. Principaux objectifs du modèle de pré-positionnements:

- Optimiser la qualité de la tôle laminée en termes de longueur, de surface et de planéité;

-Optimiser la production en augmentant les vitesses d'engagement, d'accélération et maximale;

-Maintenir les valeurs de pré-positionnement dans les limites des matériaux et du laminoir;

-Eviter les ruptures de bande, la dégradation des cylindres et les arrêts pour engagement de la tôle;

-Stabiliser les conditions de laminage;

-Minimiser les interventions de l'opérateur.

Le modèle de laminage regroupe plusieurs sous-modèles étroitement liés et basés essentiellement sur les lois de la physique:

-Plans de passes (calcul du nombre de passes et de la répartition de l'épaisseur de la tôle pour chacune);

-Pré-positionnements (calcul de toutes les valeurs de pré-positionnement requises);

-Adaptation (adaptation du modèle au vu des mesures).

Des rapports de réglages et d'adaptation sont élaborés pour chaque bobine et stockés dans la base de données pour analyse complémentaire et mise au point hors ligne du modèle.

1.3 Sous-modèles des plans de passes

Ce sous-modèle sert à calculer une répartition adéquate des réductions d'épaisseur sur plusieurs passes en fonction du type de produit laminé (matériau, nuance, largeur de bande, épaisseurs initiale et finale). Pour commencer, les limites dans lesquelles la ligne optimale doit se trouver sont définies en calculant les réductions d'épaisseur maximales, passe après passe, depuis l'épaisseur initiale en avant, puis à nouveau depuis l'épaisseur finale en arrière. Ensuite, en tenant compte des conditions aux limites établies pour le laminoir et par les pratiques, une ligne de réduction est recherchée qui se rapproche le plus du critère retenu; celui-ci peut être simplement la minimisation du temps de laminage ou l'obtention des mêmes forces de laminage pour toutes les passes.

Les seuils pratiques précités sont des conditions aux limites du procédé définies dans les tables selon le groupe de produits et peuvent spécifier, par exemple, les réductions maximales, les valeurs de traction de la bobine au cours de la première et de la dernière passe, etc.

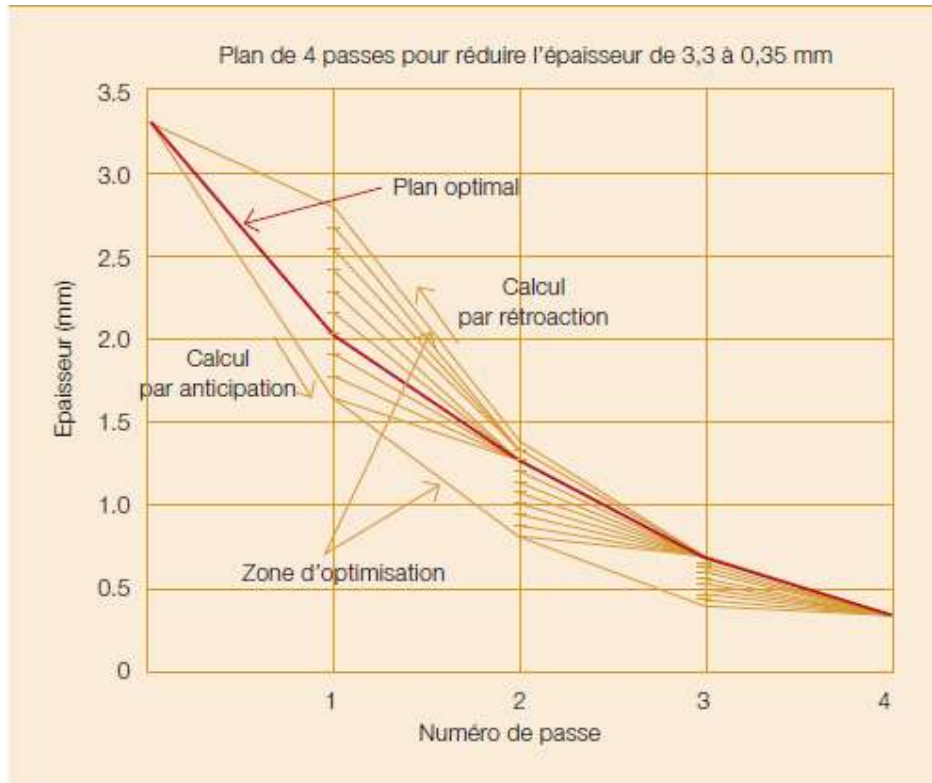


Fig. 3 Procédure de calcul des plans de passes

La répartition de la réduction par passe peut être optimisée selon plusieurs critères. Or des critères de productivité ou de qualité sont parfois contradictoires.

Des plans peuvent être élaborés pour satisfaire à des exigences de limites de réduction et de force de même que des courbes de réduction et de pression (ex., réduction constante par passe ou diminution de la force de laminage spécifique par passe). Les plans sont optimisés pour obtenir une vitesse de laminage maximale en égalisant la puissance moteur requise de toutes les passes ou cages. Pour ce faire, on modifie la répartition de la réduction ou de la traction.

Pour satisfaire à des contraintes opérationnelles comme, par exemple, le chargement ou le déchargement de la bobine d'un côté précis du laminoir, un nombre de passes pair ou impair peut être imposé. Une réduction fixe au cours de la passe finale est également définie. Pendant une passe, le système recalcule et corrige les passes suivantes si, par exemple, une épaisseur intermédiaire n'a pas été obtenue ou si le matériau laminé est plus dur que prévu.

Un composant important du calcul des plans de passes est un modèle d'écartement des cylindres basé sur les lois de la physique. Outre les valeurs d'épaisseur et de traction en entrée et en sortie, d'autres données doivent être fournies au modèle: résistance à la déformation du matériau, caractéristiques du frottement entre les cylindres et la bande.

La résistance à la déformation est décrite sous la forme d'une courbe de fluage qui, à son tour, est basée sur les résultats d'essais de traction sur des échantillons de la tôle à chaque étape du laminage. On considère que la dureté des cylindres et la vitesse de laminage exercent une influence majeure sur les conditions de frottement des cylindres. L'incidence des variations de frottement sur la force de laminage est clairement perceptible dans le cas de l'acier doux et des tôles minces.

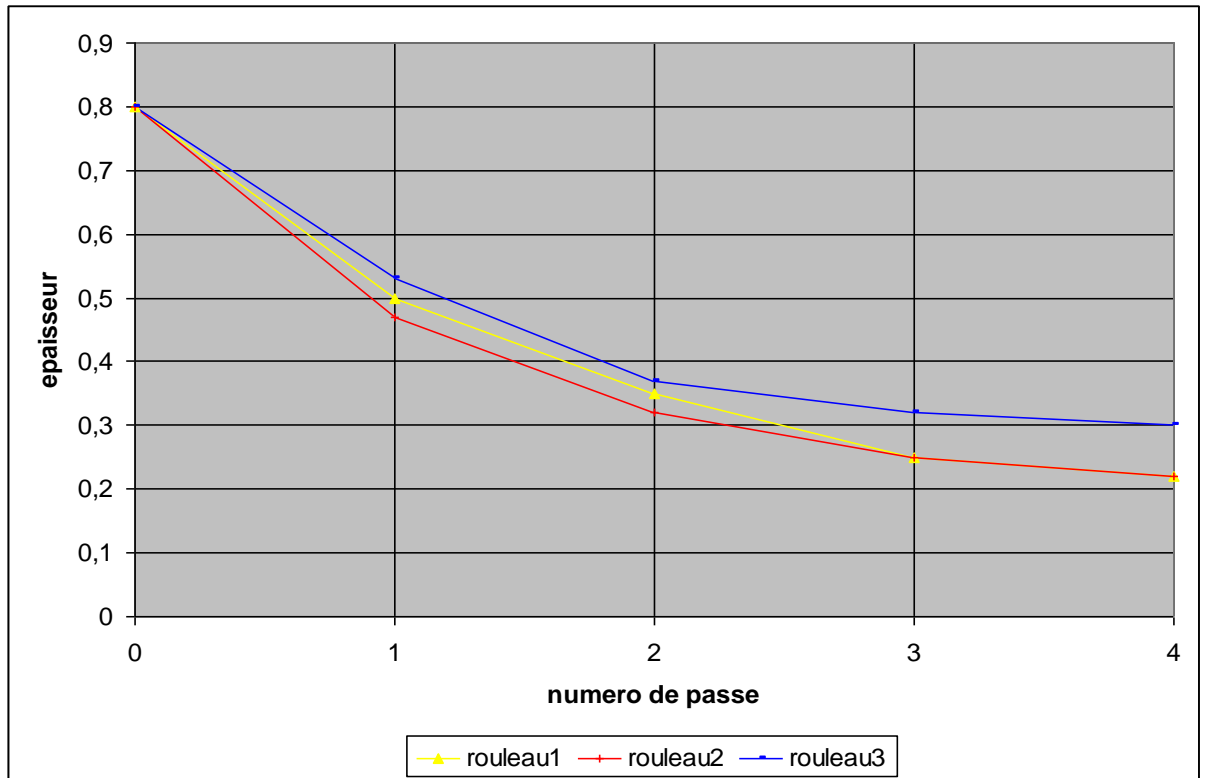


Fig. 4 Procédure de calcul des plans de passes pour trois bandes d'acier, les premières deux avec une épaisseur initiale $h_0 = 0.8$ mm et une épaisseur finale $h_4 = 0.22$ mm et la troisième avec une épaisseur finale $h_4 = 0.3$ mm

1.4 Sous-modèle de pré-positionnement

Les principales valeurs de pré-positionnement transmises au niveau 1 de l'architecture d'automatisation sont:

- Épaisseur en entrée, intermédiaire et en sortie;
- Vitesse de laminage;
- Traction en entrée, intermédiaire et en sortie;

- Force de laminage;
- Position d'écartement des cylindres;
- Couple de laminage;
- Actionneurs de planéité (flexion et décalage);
- Refroidissement.

Une fois déterminé le plan de passes, le sous-modèle de pré-positionnements calcule les autres valeurs de réglage. Parfois, les données (ex., épaisseurs et tractions) proviennent d'une table de plans de passes ou sont fournies par un système externe.

Le calcul des pré-positionnements nécessite les données suivantes:

- Épaisseur en entrée, largeur, température en entrée;
- Épaisseur du laminage à chaud ou épaisseur lors du dernier recuit;
- Matériau, type de recuit;
- Profil de la tôle, diamètre externe de la bobine;
- Épaisseur (laminoirs réducteurs) ou allongement (laminoirs d'écroissage) ciblé en sortie.

Les valeurs des cylindres comme le diamètre, la couronne, le renflement, la longueur et la texture sont également importantes pour la précision des calculs.

Les paramètres généraux comme les limites du laminoir et des entraînements, les pratiques normales, les coefficients d'adaptation, les valeurs de contrainte d'allongement et de frottement, sont stockés en local dans le système de suivi de production. Les différents sous-modèles sont étroitement liés entre eux, les sorties d'un modèle peuvent servir d'entrées aux autres modèles.

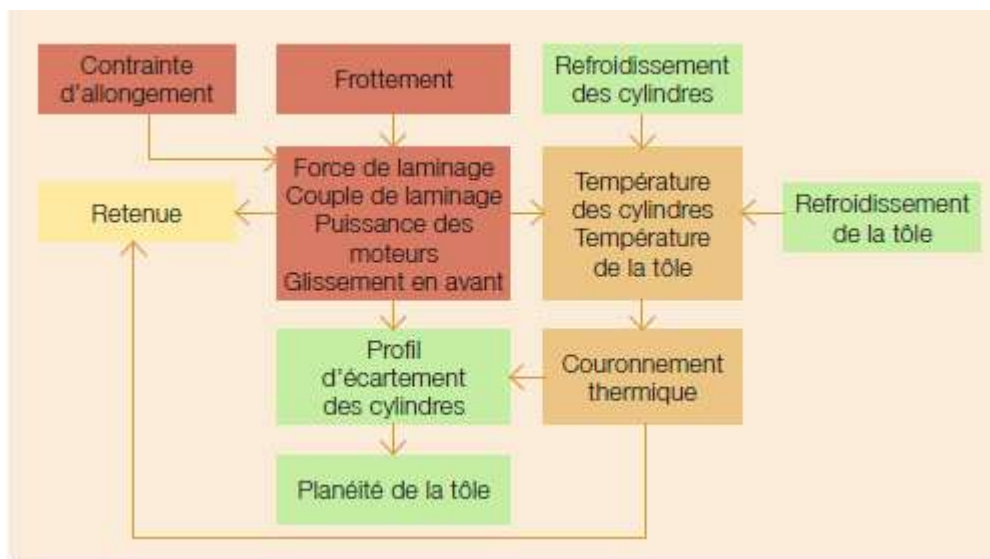


Fig. 5 Interraction des sous-modèles du modèle de laminage

La fonction de calcul de pré-positionnements détermine les conditions d'engagement, de laminage et de dégagement de toutes les passes. Les valeurs calculées sont fournies aux différentes fonctions de régulation.

Les calculs de plan de passe et de pré-positionnement sont automatiquement lancés lorsque:

- les données de la bobine sont disponibles pour la première fois (contrôle de vraisemblance);
- la bobine passe à l'état „bobine suivante” ou lorsque la bobine suivante est montée sur la dérouleuse;
- l'adaptation de la bobine précédente est terminée;
- l'opérateur en fait la demande.

Les calculs de pré-positionnement peuvent être visualisés par l'opérateur pour contrôle, modification ou mise au point. Il les transmet ensuite à l'automatisme de niveau 1, l'engagement de la bobine pouvant alors commencer. La bobine passe de l'état „bobine suivante” à l'état „bobine en cours”. Les valeurs de pré-positionnement pour celle-ci sont uniquement modifiables avec le laminoir à l'arrêt. Enfin, l'opérateur peut visualiser les valeurs de consigne de la bobine en cours et préparer celles de la bobine suivante.

1.5 Composants clés du modèle de pré-positionnement

Le modèle de laminage utilise plusieurs composants (ou sous-modèles).

Modèle de traction

Ce modèle détermine des valeurs de traction spécifiques calculées à partir de l'épaisseur de la tôle, de la contrainte d'allongement du matériau et des pratiques de traction. En particulier, la première dérouleuse et la dernière traction de bobinage dépendent des traitements préalable et postérieur qu'a subis la bobine laminée à froid. Un laminage avec des valeurs de traction inadéquates peut conduire, par exemple, au patinage de la bobine, à l'instabilité du laminage et au collage pendant le recuit en discontinu.

Modèle de vitesse

La vitesse de laminage maximale est limitée par les éléments suivants:

- Puissance maximale des entraînements (laminoir, dérouleuse/bobineuse);
- Vitesse maximale des entraînements en tenant compte du rapport de réduction;
- Température maximale de la tôle en sortie;
- Limitation de vitesse pour des raisons de qualité.

Le modèle de vitesse réduit la vitesse jusqu'à satisfaction de toutes ces limitations.

Modèle d'écartement des cylindres

Ce modèle en comporte, en fait, deux: un pour les laminoirs réducteurs et un autre pour les laminoirs d'écroutissage.

Pour les réductions de plus de 5% environ et un rapport plus important entre l'épaisseur moyenne et la longueur de contact, un modèle d'écartement des cylindres est utilisé qui tient compte de la déformation plastique et élastique de la tôle entre les cylindres.

Pour les laminoirs d'écroutissage et à tôles minces (réduction et rapport plus faibles entre l'épaisseur moyenne et la longueur de contact), on utilise un modèle en ligne. Celui-ci est réglé avec un modèle d'arc non circulaire qui calcule la force et le couple des cylindres, le glissement en avant, la déformation et l'énergie de frottement. Les perturbations du procédé sont compensées par des coefficients d'adaptation.

La contrainte d'allongement d'un produit défini est calculée à partir de la déformation, du taux de déformation et de la température de la tôle. Un produit peut être défini par une combinaison de propriétés telles que le groupe de matériaux, la nuance du matériau ou le pré-traitement (type de recuit).

Le coefficient de frottement est calculé à partir de la rugosité/texteure du cylindre de travail, de la vitesse et du numéro de la passe.

Modèle de température de la tôle

Ce modèle a pour but de prédire la température de la tôle à toutes les étapes du procédé de laminage. Cette température est utilisée par le modèle de contrainte d'allongement et le calcul des plans de passes. Plusieurs facteurs entrent en compte: température de la tôle en entrée, refroidissement par air, chaleur dissipée par le refroidisseur, chaleur produite entre les cylindres et échange thermique avec le cylindre de travail.

Si la tôle est refroidie séparément, le flux de réfrigérant doit être calculé pour que la température de la tôle en sortie reste sous une valeur maxi définie pour éviter l'apparition de défauts de surface sur la tôle (acier inox) ou d'allumage (aluminium) du fait d'une température excessive de la tôle lors du bobinage. Si la température de bobinage calculée au cours d'une passe franchit la limite de sécurité avec l'écoulement d'huile maxi autorisé, la répartition de la vitesse de laminage au cours de toutes les passes est réduite en conséquence.

Modèle de planéité

Ce modèle calcule les valeurs de pré-positionnement des actionneurs de planéité pour obtenir le profil d'écartement des cylindres et la planéité désirés. Un modèle aux différences finies prend en compte le profil de la tôle en entrée, la force de laminage, la largeur de tôle, le diamètre des cylindres, la rectification, l'aplatissement par flexion et la dilation thermique des cylindres.

Cet aspect thermique est particulièrement important lorsqu'on utilise un cylindre de travail de gros diamètre et faible efficacité de refroidissement combiné à un apport calorifique élevé entre les cylindres. Selon le type de laminoir, le modèle de profil calcule la valeur de pré-positionnement pour la force de flexion des cylindres de travail et intermédiaire ainsi que le positionnement de décalage axial des cylindres.

Modèle de position d'écartement des cylindres

Pour stabiliser le laminoir, la position d'écartement des cylindres chargés pour une épaisseur de tôle désirée doit être connue. Ce modèle calcule la position d'écartement des cylindres en tenant compte du module de la cage comme fonction non linéaire de la force de laminage, de la largeur de la tôle et du diamètre du cylindre d'appui.

La dilatation thermique des cylindres de travail et d'appui ainsi que les coefficients d'adaptation influencent également cette position.

Modèle de sensibilité

Ce modèle calcule les différences finies entre les entrées et les sorties du procédé qui peuvent ensuite servir à calculer les paramètres de régulation anticipatrice et par rétroaction de l'épaisseur, de la traction et de la planéité qui garantissent la constante de qualité des différents produits à toutes les phases de laminage.

Ainsi, par exemple, le paramètre de régulation anticipatrice de la vitesse décrit l'interdépendance de la vitesse et de la force, alors que celui de la flexion décrit la dépendance de la force sur la flexion. Ces deux régulations anticipatrices atténuent les perturbations pendant l'accélération et la décélération et sont particulièrement importantes pour la régulation par rétroaction de l'épaisseur et de la planéité.

Modèle d'adaptation

La modélisation mathématique se heurte au problème suivant: même si les corrélations physiques au sein du procédé sont connues, les paramètres sont fréquemment inconnus et peuvent même évoluer.

Dans le cas du laminage a froid, tous les paramètres (ex. contrainte d'allongement, frottement, coefficients de transfert thermique etc) ne sont pas connus et varient dans le temps, donnant souvent des prédictions imprécises.

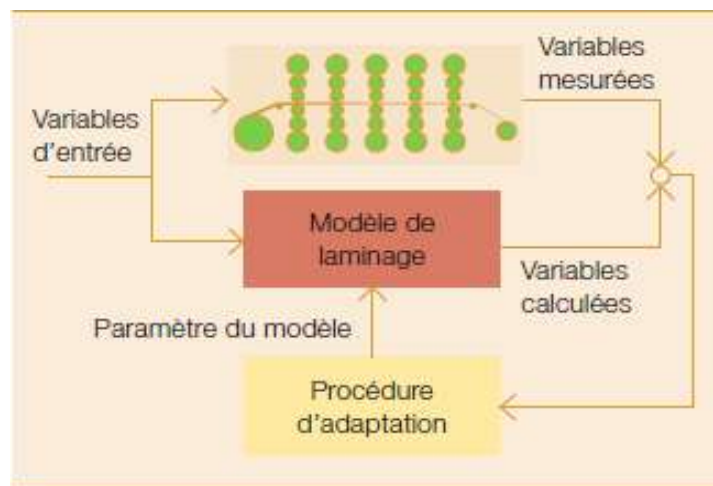


Fig. 6 Adaptation dans un modèle de laminage

Pour améliorer la précision des prédictions du modèle de pré-positionnements, une adaptation en ligne du modèle intervient pour actualiser les coefficients et les paramètres afin de tenir compte des variations des matériaux et du comportement du laminoir pendant le laminage, des mesures sont effectuées à intervalle régulier si une instrumentation est disponible (épaisseurs initiale et finale, traction de la tôle en entrée et en sortie, vitesse en entrée et en sortie, vitesse de laminage, force de laminage, force de flexion, décalage et position d'écartement des cylindres). Après un contrôle de vraisemblance, un filtrage et une estimation des valeurs non mesurées, les différentes phases de laminage sont recalculées et adaptées pour la bobine en cours afin de fournir les coefficients et paramètres d'adaptation. Les réglages de la passe suivante sont alors calculés avec une meilleure précision.

La procédure d'adaptation étudie les différences entre les variables calculées et mesurées. La vitesse d'adaptation est configurable avec un gain d'adaptation.

Une adaptation à court terme (vitesse d'adaptation rapide) est réalisée d'une passe à l'autre et une adaptation à long terme (vitesse d'adaptation lente) d'une bobine à l'autre et pour une série de bobines similaires.

Les changements de classes de produits (matériau, largeur, épaisseur etc.), les changements de cylindres et les longstems d'arrêt sont pris en compte.

Les solutions de modélisation pour les laminoirs à froid jouent un rôle important dans l'amélioration de la qualité des produits et de la productivité des sites.

CHAPITRE 2

Le modèle mathématique général du processus de laminage à froid

2.1 Introduction

Le modèle mathématique du processus de laminage est très important par ce qu'il est utilisé pour calculer les différentes grandeurs qu'influencent le processus de laminage. Ce modèle est employé dans l'algorithme du calcul d'un logiciel intitulé „LAMIN”, logiciel qui est utilisé pour estimer précisément des grandeurs plus importantes dans le processus de laminage, comme les forces et les couples nécessaires pour effectuer le laminage lui-même. Ce type de logiciel a été développé pour faciliter l'étape de calcul – il offre les résultats plus vite et, en changeant les variables d'entrée, nous pouvons observer et comparer les effets que ce changement avait sur les résultats.

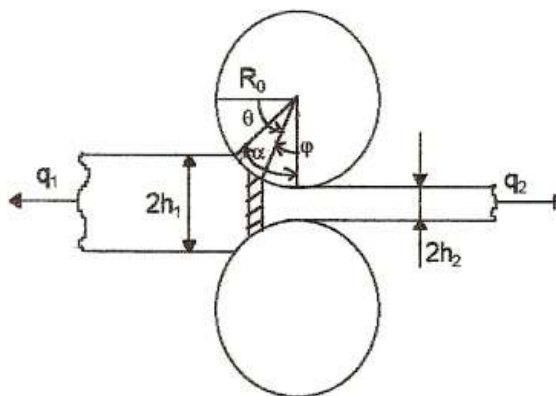


Fig. 7 Le schéma utilisé pour le modèle mathématique de laminage à froid

Le modèle mathématique du processus de déformation à froid utilise les notations suivantes:

La bande qui va être laminée est caractérisé par les grandeurs suivantes:

Des valeurs courantes:

$2h$ - l'épaisseur de la bande

θ - l'angle courant sur l'arc de contact mesuré à partir de l'axe x du cylindre vers l'axe y

φ - l'angle courant sur l'arc de contact mesuré à partir de l'axe y du cylindre vers l'axe x

p - la tension normale à la surface du cylindre
 τ - la tension tangente à la surface du cylindre
 q - la tension normale moyenne à la longueur de la bande
 τ_c - la tension tangentielle limite
 σ_c - la tension normale limite
 E_b - le module d'élasticité
 ε - la déformation spécifique
 ε_e - le terme élastique de la déformation spécifique
 ε_p - le terme plastique de la déformation spécifique
 B - la largeur de la bande
 m - le module de plasticité de la bande

Des valeurs avant le passage:

$2h_0$ - l'épaisseur initiale de la bande
 $2h_1$ - l'épaisseur de la bande après la déformation élastique
 θ_1 - l'angle initial d'accrochage de la bande
 q_1 - la tension normale moyenne a longueur de la bande

Des valeurs après le passage:

$2h_2$ - l'épaisseur de la bande à la fin de la déformation plastique
 $2h_3$ - l'épaisseur de la bande après le retour élastique
 θ_2 - l'angle final de l'arc d'accrochage
 q_2 - la tension normale moyenne au longueur de la bande

Les cylindres sont caractérisés par les grandeurs suivantes:

xOy - système de coordonnées avec le centre O sur l'axe d'un cylindre, avec x parallèle à la bande et du sens contraire au sens de mouvement de la bande, et l'axe y orienté vers la bande

$2R_0$ - le diamètre des cylindres
 $2R$ - le diamètre des cylindres déformés
 $2a_0$ - la distance entre les axes des cylindres
 $2a$ - la distance entre les axes des cylindres déformés

Les efforts pendant le laminage:

F - la force de laminage
 C - le couple de laminage

Maintenant nous décrivons les équations nécessaires pour comprendre le processus de laminage:

2.2 La géométrie

La distance entre les cylindres est :

$$2a_0 = 2R_0 + 2h_2 \quad (2.1)$$

La relation en unités relatifs est obtenue en divisant par la R_0 .

L'épaisseur courante de la bande est :

$$2h(\theta) = 2a_0 - 2R_0 \sin \theta \quad (2.2)$$

Dans le cas où les cylindres sont déformés, les relations présentées deviennent (on renonce à l'indice 0) :

$$2a = 2R + 2h_2 \quad (2.3)$$

$$2h(\theta) = 2a - 2R \sin \theta \quad (2.4)$$

Le passage en unités relatifs se fait en divisant par R .

2.3 L'équation d'équilibre

L'orientation de la force de frottement correspond à une position proche de la zone d'entrée de la bande entre les cylindres, position où les cylindres entraînent la bande. L'orientation de la force de frottement à la sortie, est inverse – les cylindres sont entraînés par la bande.

La projection sur l'axe x de l'équation d'équilibre est :

$$(q + dq)(h + dh) + pR_0 d\varphi \sin \varphi \pm \tau R_0 d\varphi \cos \varphi - qh = 0 \quad (2.5)$$

d'où résulte:

$$\frac{d(hq)}{d\varphi} + pR_0 \sin \varphi \mp \tau R_0 \cos \varphi = 0 \quad (2.6)$$

où à l'entrée on utilise le signe moins et à la sortie on utilise le signe plus.

On utilise la condition de plasticité:

$$p + q = 2\tau_c \quad (2.7)$$

qui représente une relation approximative du critère de plasticité.

La relation en unités relatifs est obtenue en divisant par $2\tau_c$

La tension tangentielle limite est:

$$2\tau_c = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_c \quad (2.8)$$

En utilisant la condition de plasticité, nous pouvons substituer q ou p dans l'équation d'équilibre ; il va résulter une équation en p ou q . Si q est substitué il résulte:

$$\frac{d(h(2\tau_c - p))}{d\varphi} = -pR_0 \sin \varphi \pm \tau R_0 \cos \varphi \quad (2.9)$$

c'est-à-dire

$$\frac{dh}{d\varphi}(2\tau_c - p) + h\left(\frac{d(2\tau_c)}{d\varphi} - \frac{dp}{d\varphi}\right) = -pR_0 \sin \varphi \pm \tau R_0 \cos \varphi \quad (2.10)$$

Ainsi

$$\frac{dp}{d\varphi} = p \frac{R_0}{h} \sin \varphi \mp \tau \frac{R_0}{h} \cos \varphi + \frac{d(2\tau_c)}{d\varphi} + q \frac{1}{h} \frac{dh}{d\varphi} \quad (2.11)$$

Pour exprimer l'équation au-dessous dans une forme plus simple, on utilise la relation suivante pour h:

$$h = h_2 + R_0(1 - \cos \varphi) \quad (2.12)$$

d'où résulte:

$$\frac{dh}{d\varphi} = R_0 \sin \varphi \quad (2.13)$$

$$\frac{dp}{d\varphi} = \mp \tau \frac{R_0}{h} \cos \varphi + \frac{d(2\tau_c)}{d\varphi} + \frac{2\tau_c}{h} \frac{dh}{d\varphi} \quad (2.14)$$

Pour le passage en unités relatifs on utilise:

$$p = p^* 2\tau_c \quad (2.15)$$

$$h = h^* R_0 \quad (2.16)$$

$$\tau = \tau^* 2\tau_c \quad (2.17)$$

$$2\tau_c \frac{dp^*}{d\varphi} + p^* \frac{d(2\tau_c)}{d\varphi} = \mp \tau^* 2\tau_c \frac{1}{h^*} \cos \varphi + \frac{d(2\tau_c)}{d\varphi} + \frac{2\tau_c}{h^*} \frac{dh^*}{d\varphi} \quad (2.18)$$

$$\frac{dp^*}{d\varphi} = \mp \tau^* \frac{1}{h^*} \cos \varphi + q^* \frac{1}{2\tau_c} \frac{d(2\tau_c)}{d\varphi} + \frac{1}{h^*} \frac{dh^*}{d\varphi} \quad (2.19)$$

relation dans laquelle la relation suivante a été utilisé:

$$p^* + q^* = 1 \quad (2.20)$$

Considerant maintenant l'expression de h , et le lien entre la tension tangentielle limite et la tension normale limite on obtient:

$$\frac{dp^*}{d\varphi} = \frac{1}{h^*} (\sin \varphi \mp \tau^* \cos \varphi) + q^* \frac{1}{\sigma_c} \frac{d(\sigma_c)}{d\varphi} \quad (2.21)$$

Si l'angle θ est utilisé, il résulte:

$$\frac{dq^*}{d\theta} = \frac{1}{h^*} (\cos \theta \mp \tau^* \sin \theta) - q^* \frac{1}{\sigma_c} \frac{d(\sigma_c)}{d\theta} \quad (2.22)$$

2.4 La force de frottement

La force de frottement τ peut être calculée en tenant compte du coefficient de frottement μ :

$$\tau = \mu p \quad (2.23)$$

si $\mu p < \tau_c$, et avec la relation

$$\tau = \tau_c \quad (2.24)$$

au contraire.

2.5 Les conditions limite

Si la variable p est employé, les conditions limite sont:

$$q = q_1 \text{ à } \varphi = \varphi_1 \quad (2.25)$$

$$q = q_2 \text{ à } \varphi = \varphi_2 \quad (2.26)$$

A partir de la condition de déformation plastique résulte:

$$p_1 = 2\tau_{c1} - q_1 \quad (2.27)$$

et

$$p_2 = 2\tau_{c2} - q_2 \quad (2.28)$$

Si la variable q est employé, les conditions limite sont:

$$q = q_1 \text{ à } \theta = \theta_1 \quad (2.29)$$

$$q = q_2 \text{ à } \theta = \theta_2 \quad (2.30)$$

L'angle initial d'accrochage θ_1 correspond à $h(\theta) = h_1$, et pour l'angle final de l'arc

d'accrochage θ_2 correspond à $h(\theta) = h_2$ si $dh(\theta) = 0$

L'épaisseur qui correspond à l'angle d'accrochage θ est noté avec $h(\theta) = h_1$, et l'angle finale

d'accrochage θ_2 correspond à $h(\theta) = h_2$ si $dh(\theta) = 0$

2.6 La résolution approximative d'équation de laminage

Si la variable p est employée, pour la force de frottement nous utilisons

l'expression suivante:

$$\tau = \mu p \quad (2.31)$$

puis l'équation d'équilibre est:

$$\frac{1}{p^*} \frac{dp^*}{d\varphi} + \left(1 - \frac{1}{p^*}\right) \frac{1}{h\sigma_c} \frac{d(h\sigma_c)}{d\varphi} = \frac{1}{h^*} (\sin \varphi \mp \mu \cos \varphi) \quad (2.32)$$

En tenant compte que

$$\frac{1}{p^*} \frac{dp^*}{d\varphi} \gg \left(1 - \frac{1}{p^*}\right) \frac{1}{h\sigma_c} \frac{d(h\sigma_c)}{d\varphi} \quad (2.33)$$

il résulte:

$$\frac{1}{p^*} \frac{dp^*}{d\varphi} = \frac{1}{h^*} (\sin \varphi \mp \mu \cos \varphi) \quad (2.34)$$

En supposant que les angles sont très petits et en imposant les conditions initiales, les solutions suivantes sont obtenues:

$$p^+ = 2\tau_c \frac{h}{h_2} (1 - q_2^*) e^{\mu H(\varphi)} \quad (2.35)$$

$$p^- = 2\tau_c \frac{h}{h_1} (1 - q_1^*) e^{\mu(H_1 - H(\varphi))} \quad (2.36)$$

où

$$H(\varphi) = \sqrt{\frac{2}{h_2^*}} \arctan \sqrt{\frac{1}{2h_2^*}} \varphi \quad (2.37)$$

Et

$$H_1 = H(\alpha) \quad (2.38)$$

Le point neutre (le point où la force de frottement change son signe) est obtenu avec la relation:

$$p^+ = p^- \quad (2.39)$$

Il résulte:

$$H_n = \frac{1}{2} H_1 - \frac{1}{2\mu} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \frac{1 - q_2^*}{1 - q_1^*} \right) \quad (2.40)$$

et l'angle neutre:

$$\varphi_n = \sqrt{2h_2^*} \tan \sqrt{\frac{h_2^*}{2}} H_n \quad (2.41)$$

2.7 La résolution exacte d'équation de laminage

Il est impératif de résoudre l'équation

$$\frac{dq^*}{d\theta} = \frac{1}{h^*} (\cos \theta \mp \tau^* \sin \theta) - q^* \frac{1}{\sigma_c} \frac{d(\sigma_c)}{d\theta} \quad (2.42)$$

où:

$$\tau^* = \mu p^* \text{ si } \mu p^* < 1/2 \text{ et } \tau^* = 1/2 \text{ au contraire.}$$

La tension normale en unités relatifs est:

$$p^* = 1 - q^* \quad (2.43)$$

Nous utilisons aussi les relations:

$$h^* = a_0^* - \sin \theta \quad (2.44)$$

$$a_0^* = 1 + h_2^*$$

L'équation est résolue en utilisant les conditions limite:

$$q^* = q_1^*, \theta = \theta_1 \quad (2.45)$$

$$q^* = q_2^*, \theta = \theta_2$$

On considère que la force de frottement change son signe plus vite, et que l'algorithme suivant peut être suivi.

On utilise les données: $R_0, h_1, h_2, \sigma_c, \mu$.

Les résultats sont: q, p, τ .

1. On intègre l'équation au-dessus en utilisant le signe „-”, en partant de l'angle θ_1 déterminé avec la relation:

$$h(\theta_1) = h_1 \quad (2.46)$$

c'est-à-dire de

$$\sin \theta_1 = (R_0 + h_2 - h_1) / R_0 \quad (2.47)$$

avec la condition initiale

$$q^*(\theta_1) = q_1^* \quad (2.48)$$

On finit l'intégration à $\theta = \theta_2$

2. En intégrant l'équation utilisant le signe „+” de l'angle θ_2 déterminé avec la relation:

$$dh(\theta_2) = 0 \quad (2.49)$$

c'est-à-dire de

$$\cos \theta_2 = 0 \quad (2.50)$$

avec la condition initiale

$$q^*(\theta_2) = q_2^* \quad (2.51)$$

On finit l'intégration à $\theta = \theta_1$

3. On détermine et puis on intersecte les courbes p^- et p^+ ; les branches inutiles sont éliminées.

2.8 Le retour élastique de la bande

On considère que la déformation spécifique de la bande est exprimée à l'aide de la relation:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (2.52)$$

et que la déformation totale peut être décomposé dans deux termes, un terme élastique et un autre plastique:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (2.53)$$

où

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_c}{E} \quad (2.54)$$

Le retour est purement élastique, ainsi la variation d'épaisseur est:

$$\delta_h = \frac{\sigma_c h}{E} \quad (2.55)$$

On note avec h' l'épaisseur finale du matériau, quand les efforts ont été lointaines. Pour h' nous avons la relation:

$$h' = h + h \frac{\sigma_c}{E} = h \left(1 + \frac{\sigma_c}{E}\right) \quad (2.56)$$

Ainsi le retour élastique de la bande à la sortie des cylindres de laminage est donné par la relation:

$$\delta_h = \frac{\sigma_{c2} h_2}{E_b} \quad (2.57)$$

Et l'épaisseur réelle à la sortie est:

$$h_3 = h_2 \left(1 + \frac{\sigma_{c2}}{E_b}\right) \quad (2.58)$$

On peut aussi calculer l'angle qui correspond à cette épaisseur:

$$h(\theta_3) = h_3 \quad (2.59)$$

Ainsi

$$R_0 + h_2 - R_0 \sin \theta_3 = h_3 \quad (2.60)$$

d'où résulte:

$$\sin \theta_3 = \frac{R_0 + h_2 - h_3}{R_0} \quad (2.61)$$

où

$$\theta_3 > \frac{\pi}{2} \quad (2.62)$$

Pour calculer les forces de laminage, on considère que la tension normale et la force de frottement ont une distribution linéaire:

$$p(\theta) = p_2 \frac{\theta_3 - \theta}{\theta_3 - \theta_2} \quad (2.63)$$

$$\tau(\theta) = \mu p(\theta) \quad (2.64)$$

De même, on peut tenir compte de la déformation élastique à l'entrée:

$$\delta_h = \frac{\sigma_{cl} h_0}{E_b} \quad (2.65)$$

et que l'épaisseur réelle à l'entrée de la bande est:

$$h_1 = h_0 - h_0 \frac{\sigma_{cl}}{E_b} = h_0 \left(1 - \frac{\sigma_{cl}}{E_b}\right) \quad (2.66)$$

Nous pouvons calculer l'angle qui correspond à cette épaisseur:

$$h(\theta_0) = h_0 \quad (2.67)$$

ainsi

$$R_0 + h_2 - R_0 \sin \theta_0 = h_0 \quad (2.68)$$

d'où résulte:

$$\sin \theta_0 = \frac{R_0 + h_2 - h_0}{R_0} \quad (2.69)$$

Pour calculer les forces de laminage, on considère que la tension normale et la force de frottement ont une distribution linéaire dans les conditions suivantes:

$$p(\theta) = p_1 \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \quad (2.70)$$

$$\tau(\theta) = \mu p(\theta) \quad (2.71)$$

Usuellement l'épaisseur d'entrée h_0 et de sortie h_3 sont connus, et h_1 et h_2 doit être calculés.

Pour trouver l'épaisseur h_1 nous devons tenir compte de:

$$\sigma_{c0} = \sigma_{c1} \quad (2.72)$$

en utilisant la relation

$$h_1 = h_0 \left(1 - \frac{\sigma_{c0}}{E_b}\right) \quad (2.73)$$

L'épaisseur h_2 est déterminé à l'aide de la relation:

$$h_3 = h_2 \left(1 + \frac{\sigma_{c2}}{E_b}\right) \quad (2.74)$$

où

$$\sigma_{c2} = \sigma_c(h_2) \quad (2.75)$$

Usuellement, la tension de coule est exprimée en fonction de la déformation plastique:

$$\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_p) \quad (2.76)$$

où

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e = \frac{h_0 - h}{h_0} - \frac{\sigma_c}{E_b} \quad (2.77)$$

2.9 Les forces de laminage

La force et le couple de laminage sont trouvés en utilisant les relations suivantes:

$$F = \int_{\theta_0}^{\theta_3} pR d\theta = R \int_{\theta_0}^{\theta_3} \tau d\theta \quad (2.78)$$

$$C = \int_{\theta_0}^{\theta_3} \tau R^2 d\theta = R^2 \int_{\theta_0}^{\theta_3} \tau d\theta \quad (2.79)$$

Dans le cas où la déformation des cylindres est considérée aussi, la relation de calcul pour le couple se modifie:

$$C = \int_{\theta_0}^{\theta_3} \tau R_0 R d\theta = R_0 R \int_{\theta_0}^{\theta_3} \tau d\theta \quad (2.80)$$

où R est la rayon courante déformée des cylindres, et R_0 est la rayon initiale des cylindres.

2.10 Le module de plasticité de la bande

Dans l'algorithme d'asservissement d'épaisseur de la bande on utilise le module de plasticité de la bande. Il est contenu dans la relation:

$$F = (2h_0 - 2h_3)m \quad (2.81)$$

Cette relation est utilisée pour le calcul du paramètre m , dans le cas où la force de laminage est connue:

$$m = \frac{F}{2h_0 - 2h_3} \quad (2.82)$$

2.11 La déformation des cylindres

La déformation des cylindres est déterminé par les forces de laminage, et à son tour, elle influence aussi les forces pendant le laminage. En introduisant dans les calculs la déformation des cylindres, l'équation linéaire de laminage devient une matière non-linéaire.

On considère que par la déformation, les cylindres changent ses rayons localement. Le paramètre va être le rayon (déformée) des cylindres.

Pour déterminer le rayon des cylindres, nous utilisons la formule de Hitchcock:

$$R = \left(1 + \frac{8(1-\nu^2)}{\pi E} \frac{F}{B(h_1 - h_2)}\right) R_0 \quad (2.83)$$

Pour résoudre cette problème non-linéaire de l'équation de laminage, nous pouvons utiliser l'algorithme suivant:

0. On impose la rayonne déformée calculée $R' = R_0$.
1. On impose la rayonne de calcul $R = R'$.
2. On résoutre l'équation de laminage en utilisant la valeur R de la rayonne du cylindre.
3. On détermine la force de laminage F .
4. On détermine la rayonne déformée R' par la relation Hitchcock.
5. Si R' est différent de R , alors on revient à pas 1, si non, le calcul est finit.

CHAPITRE 3

Description du logiciel LAMIN

3.1 Introduction

Les logiciels ont devenus essentielles dans le développement en général grâce à leur relative simplicité, à leur flexibilité et grand pouvoir de calcul. Avec leur utilisation, la précision et la productivité ont augmenté significativement et l'entière processus de développement a été optimisé en ce qui concerne les temps et la difficulté de développement. Par exemple, un entière schéma électrique peut être changé en totalité dans quelques secondes, à l'aide des logiciels. Dans le cas d'un laminoir toutes les paramètres peuvent être modifiés facilement parce que le modèle n'est pas réalisé physiquement, il est implémenté dans un logiciel, qui tient compte des influences entre tous les paramètres du processus. Les résultats sont disponibles en court temps, l'effet des modifications est visible immédiatement. À l'aide de la simulation, nous pouvons découvrir des défauts cachés ou personnes s'atteindrait, ou des erreurs humaines à cause d'accidents.

Le logiciel LAMIN est utilisé pour analyser le processus de laminage, et pour estimer des grandeurs qui interviennent dans ce processus.

3.2 Description générale

Les données et les résultats peuvent être introduites/visualisées via les menus (Date, Rapport, Analiza, etc) ou via les boutons (les boutons sont des raccourcis vers les plus utilisées commandes).

La description du menu :

- Date – utilisé pour introduire et sauver des données
- Rapport – afficher le rapport du passage respectif
- Analiza – analyser en détail les paramètres d'un passage
- Forte – estimer les paramètres du processus de laminage
- Optiuni – établir les options du calcul

La ligne des boutons est constituée des fonctions suivantes (de gauche à droite):

- introduire des données
- sauver des données
- introduire ou modifier les caractéristiques géométriques
- introduire ou modifier les caractéristiques élastiques
- introduire ou modifier les caractéristiques plastiques
- introduire ou modifier les coefficients de frottement
- introduire ou modifier les paramètres d'intégration
- retourner vers le passage antérieur ou diminuer le numéro des passages
- avancer au suivant passage ou augmenter le numéro des passages
- l'affichage de rapport des données (D) du passage courant
- l'affichage de rapport des résultats (R) du passage courant
- l'affichage graphique des résultats qui correspondent au passage courant
- impressionner les résultats du dernier rapport

3.3 Les étapes nécessaires pour faire une estimation L'introduction des données

Logique, pour faire des calculs nous avons besoin de deux choses : grandeurs d'entrée et un algorithme de calcul. L'algorithme est implémenté dans le logiciel, le modèle mathématique général du laminage, dont nous ne faisons qu'introduire les paramètres nécessaires pour que l'algorithme se déroule sans erreurs. Les paramètres peuvent être introduits en accésant le menu „Date-Modifica”. Nous pouvons introduire des nouveaux donnés ou de charger des donnés sauvs une autre fois, dans ce cas, nous accésions le menu „Date-Incarca”.

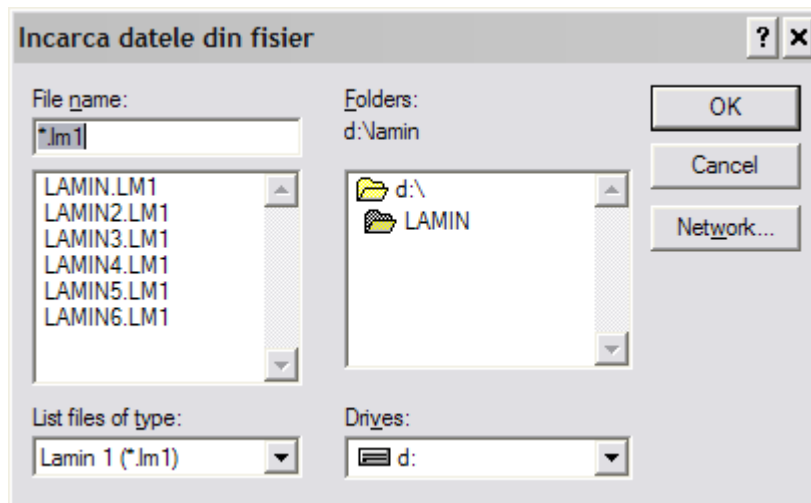


Fig. 8 Le menu utilisé pour charger les données sauvs

Naturellement, toutes les données introduites peuvent être sauvs: „Date-Salveaza”, pour pouvoir les utiliser ultérieurement.

Les paramètres que nous pouvons introduire sont divisés en cinq catégories, comme suit:

- paramètres qui concernent la géométrie

Fig. 9 Le menu „Date-Modifica-Geometrie”

Dans ce menu, nous choisissons aussi le type de laminoir – quarto ou tandem, dans notre cas le laminoir est de type quarto.

- paramètres qui concernent le module d'élasticité des matériaux et des cylindres

Fig. 10 Le menu „Date-Modifica-Materiale”

- paramètres qui concernent la tension limite de la bande

	Reducerea	Tensiunea limita
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		

Grosime de referinta (2href):

Fig. 11 Le menu „Date-Modifica-Tensiune limita”

Nous choisissons „Genereaza”, puis le menu suivant apparait :

$$\sigma_c = A + B\varepsilon^C$$

Tensiunea de curgere init. (A): kgf/mm²

Coeficientul deformatiei (B): kgf/mm²

Exponentul deformatiei (C):

Pas deformatie specifica:

Numarul de pasi:

Fig. 12 Les paramètres de la tension limite A, B, C

Ces paramètres peuvent être déterminés en manière expérimentale, ou en manière analytique ; quand nous sélectionnons „Salvează”, les données sont générées.

Tensiunea limita		
	Reducerea	Tensiunea limita
1	.000	20,000
2	.050	29,103
3	.100	35,849
4	.150	41,922
5	.200	47,595
6	.250	52,988
7	.300	58,168
8	.350	63,177
9	.400	68,045
10	.450	72,792
11		
12		
13		
14		

Grosime de referinta (2h_{ref}): 0.7

Salveaza Renunta Genereaza

Fig. 13 Le menu „Date-Modifica-Tensiune limita”

Nous introduisons aussi le paramètre $2h_{ref}$ et puis nous pressons le bouton „Salveaza”.

- paramètres qui concernent la force de frottement

Coeficient de frecare		
	Unghiul	Coeficient de frecare
1	0	0.14
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		

Salveaza Renunta

Fig. 14 Le menu „Date-Modifica-Fora de frecare”

Nous avons adopté une seule valeur de coefficient de frottement, indifférent de l'angle de contact.

- paramètres d'intégration

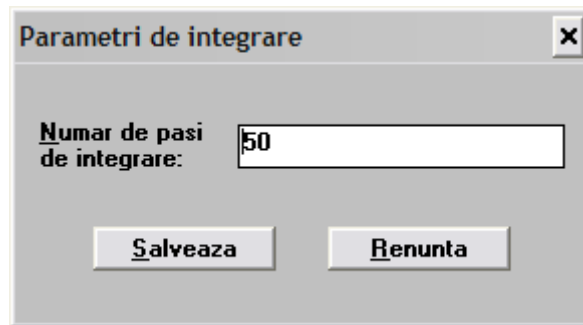


Fig. 15 Le menu „Date-Modifica-Parametri de integrare”

Ici, il s'agit du nombre de pas d'intégration, si le nombre augmente, la précision augmente aussi.

Pour ajouter des passages, nous nous concentrons sur le menu „Date-Caja”. Dans ce menu nous pouvons augmenter ou diminuer le nombre des passes, „Creste numar caje” et respectivement „Scade numar caje”, ou de modifier l'épaisseur de sortie du chaque passage.

La représentation graphique

Le résultat graphique pour le passage courant peut être visualisé dans le menu „Raport – Grafica”; si nous appliquons par exemple la réduction d'épaisseur suivante

Epaisseur d'entrée $2h_0$ [mm]	Epaisseur de sortie $2h_3$ [mm]	Δh absolut [mm]
0.8	0.5	0.3

nous obtiendrons le graphique de la variation des composantes de la force sur la longueur de l'arc de contact.

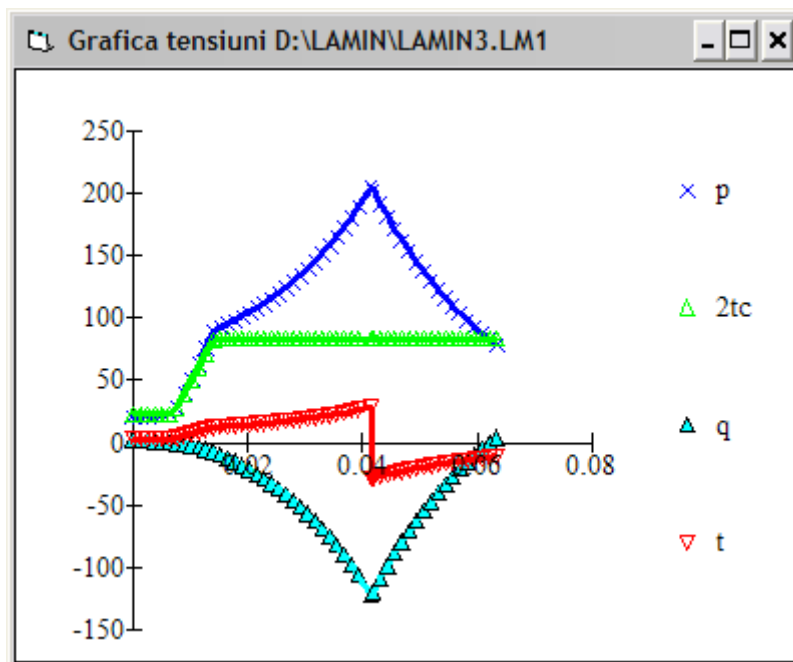


Fig. 16 La représentation graphique de la variation des composantes de la force

On peut afficher graphiquement pour le passage courant tous les grandeurs composantes:

- la force transversale p ;
- la force longitudinale q ;
- la force de frottement t ;
- la tension de l'écoulement $2tc$;

ou seulement celles que nous voulons visualiser en accésant le menu „Raport” et en selectant les composantes que nous desirons représenter, comme illustre le menu suivant:

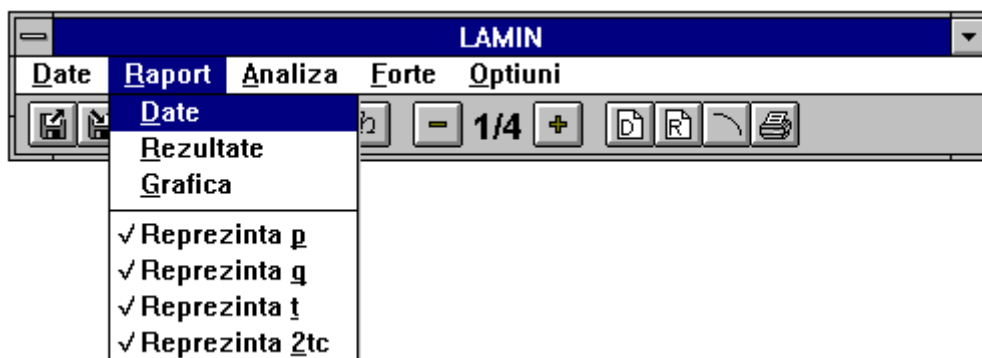


Fig. 17 Vue dans le menu „Raport” qui nous donne la représentation graphique

CHAPITRE 4 Mémoire de calcul

4.1 La simulation numérique du processus de laminage en utilisant les données acquisitionnés du processus pour le réglage de l'épaisseur à un laminoir quarto réversible

A l'aide du logiciel LAMIN, décrit dans le chapitre précédent, on réalise la simulation numérique de réglage de l'épaisseur de la bande laminée pour 3 rouleaux, en utilisant les dates réelles acquisitionnés du processus de laminage.

ROULEAU 1

I-ère passe

DATE

GEOMETRIE

Diametrul cilindrilor (2R0) = 150 mm

Latimea benzii (L) = 250 mm

Grosimea la intrare (2h0) = 0.8 mm

Grosimea la iesire (2h3) = 0.5 mm

Tensiunea la intrare (T1) = 450 kgf

Tensiunea la iesire (T2) = 550 kgf

MATERIALE

Modulul de elasticitate al cilindrilor (Ec) = 2.2e+4 kgf/mm²

Coeficientul Poisson al cilindrilor (nc) = 0.3

Modulul de elasticitate al benzii (Eb) = 2.1e+4 kgf/mm²

TENSIUNI LIMITA - BANDA

Grosime de referinta (2href) = 0.7 mm

Reducere specifica	Tensiune kgf/mm ²
,000	20,000
,050	29,103
,100	35,849
,150	41,922
,200	47,595
,250	52,988
,300	58,168
,350	63,177
,400	68,045
,450	72,792

COEFICIENT DE FRECARA

Unghi rad	Coeficient
0	0.14

PARAMETRI DE INTEGRARE

Numar de pasi de integrare = 50

REZULTATE

ARCUL DE ANTRENARE

Unghiul de intrare (theta 0) = 1,50736 rad
Unghiul de inceput (theta 1) = 1,50744 rad
Unghiul de sfirsit (theta 2) = 1,57080 rad
Unghiul de iesire (theta 3) = 1,57557 rad
Arcul de antrenare = 0,06336 rad

FORTE DE LAMINARE CORECTATE

Fora corectata = 137.439,675 kgf
Modul plasticitate = 458.132,250 kgf/mm
Cuplul corectat = 231.354,650 kgf.mm

Corectie forta 1 = 15,667 kgf
Corectie forta 2 = 3.523,110 kgf

Corectie cuplu 1 = 164,506 kgf.mm
Corectie cuplu 2 = -36.992,657 kgf.mm

TENSIUNI

Unghi rad	Tensiunea Q kgf/mm ²	Tensiunea P kgf/mm ²	Tensiunea TAU kgf/mm ²
1,507	2,250	20,844	2,918
1,509	1,889	21,205	2,969
1,510	1,503	21,591	3,023
1,511	1,089	22,005	3,081
1,513	0,646	22,448	3,143
1,514	0,173	22,921	3,209
1,515	-0,376	28,273	3,958
1,516	-1,092	39,798	5,572
1,518	-2,113	51,627	7,228

II-ème passe

DATE

GEOMETRIE

Diametrul cilindrilor (2R0) = 150 mm

Latimea benzii (L) = 250 mm

Grosimea la intrare (2h0) = 0.5 mm

Grosimea la iesire (2h3) = 0.35 mm

Tensiunea la intrare (T1) = 550 kgf

Tensiunea la iesire (T2) = 550 kgf

MATERIALE

Modulul de elasticitate al cilindrilor (Ec) = 2.2e+4 kgf/mm²

Coeficientul Poisson al cilindrilor (nc) = 0.3

Modulul de elasticitate al benzii (Eb) = 2.1e+4 kgf/mm²

TENSIUNI LIMITA - BANDA

Grosime de referinta (2href) = 0.7 mm

Reducere specifica	Tensiune kgf/mm ²
,000	20,000
,050	29,103
,100	35,849
,150	41,922
,200	47,595
,250	52,988
,300	58,168
,350	63,177
,400	68,045
,450	72,792

COEFICIENT DE FRECARA

Unghi rad	Coeficient
0	0.14

PARAMETRI DE INTEGRARE

Numar de pasi de integrare = 50

REZULTATE

ARCUL DE ANTRENARE

Unghiul de intrare (theta 0) = 1,52589 rad
Unghiul de inceput (theta 1) = 1,52615 rad
Unghiul de sfirsit (theta 2) = 1,57080 rad
Unghiul de iesire (theta 3) = 1,57479 rad
Arcul de antrenare = 0,04465 rad

FORTE DE LAMINARE CORECTATE

Forta corectata = 119.841,139 kgf
Modul plasticitate = 798.940,924 kgf/mm
Cuplul corectat = 159.192,978 kgf.mm

Corectie forta 1 = 188,476 kgf
Corectie forta 2 = 2.877,051 kgf

Corectie cuplu 1 = 1.978,997 kgf.mm
Corectie cuplu 2 = -30.209,038 kgf.mm

TENSIUNI

Unghi rad	Tensiunea Q kgf/mm ²	Tensiunea P kgf/mm ²	Tensiunea TAU kgf/mm ²
1,526	4,400	78,738	11,023
1,527	2,352	80,787	11,310
1,528	0,176	82,963	11,615
1,529	-2,135	85,273	11,938
1,530	-4,589	87,728	12,282
1,531	-7,195	90,334	12,647
1,532	-9,962	93,101	13,034
1,532	-12,901	96,039	13,446
1,533	-16,021	99,159	13,882

III-ème passe

DATE

GEOMETRIE

Diametrul cilindrilor (2R0) = 150 mm
Latimea benzii (L) = 250 mm
Grosimea la intrare (2h0) = 0.35 mm
Grosimea la iesire (2h3) = 0.25 mm
Tensiunea la intrare (T1) = 450 kgf
Tensiunea la iesire (T2) = 450 kgf

MATERIALE

Modulul de elasticitate al cilindrilor (E_c) = $2.2e+4$ kgf/mm²

Coeficientul Poisson al cilindrilor (ν_c) = 0.3

Modulul de elasticitate al benzii (E_b) = $2.1e+4$ kgf/mm²

TENSIUNI LIMITA - BANDA

Grosime de referinta ($2h_{ref}$) = 0.7 mm

Reducere specifica	Tensiune kgf/mm ²
,000	20,000
,050	29,103
,100	35,849
,150	41,922
,200	47,595
,250	52,988
,300	58,168
,350	63,177
,400	68,045
,450	72,792

COEFICIENT DE FRECARA

Unghi rad	Coeficient
0	0.14

PARAMETRI DE INTEGRARE

Numar de pasi de integrare = 50

REZULTATE

ARCUL DE ANTRENARE

Unghiul de intrare (θ_0) = 1,53412 rad

Unghiul de inceput (θ_1) = 1,53434 rad

Unghiul de sfirsit (θ_2) = 1,57080 rad

Unghiul de iesire (θ_3) = 1,57417 rad

Arcul de antrenare = 0,03645 rad

FORTE DE LAMINARE CORECTATE

Fora corectata = 108.880,480 kgf

Modul plasticitate = 1.088.804,798 kgf/mm

Cuplul corectat = 115.678,781 kgf.mm

Corectie forta 1 = 160,024 kgf
Corectie forta 2 = 2.402,624 kgf

Corectie cuplu 1 = 1.680,252 kgf.mm
Corectie cuplu 2 = -25.227,557 kgf.mm

TENSIUNI

Unghi rad	Tensiunea Q kgf/mm ²	Tensiunea P kgf/mm ²	Tensiunea TAU kgf/mm ²
1,534	5,143	77,996	10,919
1,535	2,554	80,585	11,282
1,536	-0,206	83,344	11,668
1,537	-3,148	86,286	12,080
1,537	-6,284	89,422	12,519
1,538	-9,627	92,765	12,987
1,539	-13,191	96,330	13,486
1,539	-16,992	100,131	14,018
1,540	-21,045	104,184	14,586

IV-ème passe

DATE

GEOMETRIE

Diametrul cilindrilor (2R0) = 150 mm
Latimea benzii (L) = 250 mm
Grosimea la intrare (2h0) = 0.25 mm
Grosimea la iesire (2h3) = 0.22 mm
Tensiunea la intrare (T1) = 450 kgf
Tensiunea la iesire (T2) = 450 kgf

MATERIALE

Modulul de elasticitate al cilindrilor (Ec) = 2.2e+4 kgf/mm²
Coeficientul Poisson al cilindrilor (nc) = 0.3
Modulul de elasticitate al benzii (Eb) = 2.1e+4 kgf/mm²

TENSIUNI LIMITA - BANDA

Grosime de referinta (2href) = 0.7 mm

Reducere specifica	Tensiune kgf/mm ²
,000	20,000
,050	29,103
,100	35,849
,150	41,922
,200	47,595
,250	52,988

,300	58,168
,350	63,177
,400	68,045
,450	72,792

COEFICIENT DE FRECARA

Unghi rad	Coeficient
0	0.14

PARAMETRI DE INTEGRARE

Numar de pasi de integrare = 50

REZULTATE

ARCUL DE ANTRENARE

Unghiul de intrare (theta 0) = 1,55055 rad
 Unghiul de inceput (theta 1) = 1,55083 rad
 Unghiul de sfirsit (theta 2) = 1,57080 rad
 Unghiul de iesire (theta 3) = 1,57396 rad
 Arcul de antrenare = 0,01997 rad

FORTE DE LAMINARE CORECTATE

Forta corectata = 47.767,470 kgf
 Modul plasticitate = 1.592.249,002 kgf/mm
 Cuplul corectat = 12.303,741 kgf.mm

Corectie forta 1 = 202,335 kgf
 Corectie forta 2 = 2.224,721 kgf

Corectie cuplu 1 = 2.124,519 kgf.mm
 Corectie cuplu 2 = -23.359,569 kgf.mm

TENSIUNI

Unghi rad	Tensiunea Q kgf/mm ²	Tensiunea P kgf/mm ²	Tensiunea TAU kgf/mm ²
1,551	7,200	75,938	10,631
1,551	4,972	78,166	10,943
1,552	2,648	80,490	11,269
1,552	0,223	82,916	11,608
1,552	-2,308	85,446	11,962
1,553	-4,948	88,086	12,332
1,553	-7,702	90,840	12,718
1,554	-10,575	93,714	13,120
1,554	-13,573	96,711	13,540

Maintenant, on pose dans un tableau les variations de l'épaisseur en valeurs absolues et relatifs obtenus en fonction de la réduction de l'épaisseur d'entrée et aussi la force de laminage nécessaire pour obtenir l'épaisseur de sortie désirée.

Tableau 1

Nr. rulou	Épaisseur Entrée [mm]	Epaisseur Sortie [mm]	Δh absolu [mm]	Δh relatif [%]	Force de laminage [tf]
1	0.8	0.5	0.3	37%	137
	0.5	0.35	0.15	30%	120
	0.35	0.25	0.1	28.5%	109
	0.25	0.22	0.03	12%	48
2	0.8	0.47	0.33	41%	150
	0.47	0.32	0.15	32%	125
	0.32	0.25	0.07	21.8%	83
	0.25	0.22	0.03	12%	48
3	0.8	0.53	0.27	33%	125
	0.53	0.37	0.16	30%	122
	0.37	0.32	0.05	13.5%	60
	0.32	0.3	0.02	6%	35

Suivant ce tableau et à l'aide du logiciel EXCEL on peut visualiser graphiquement l'évolution de l'épaisseur en fonction des nombres des passes et on peut déterminer le plan optimal en tenant compte des plusieurs critères de productivité et de qualité.

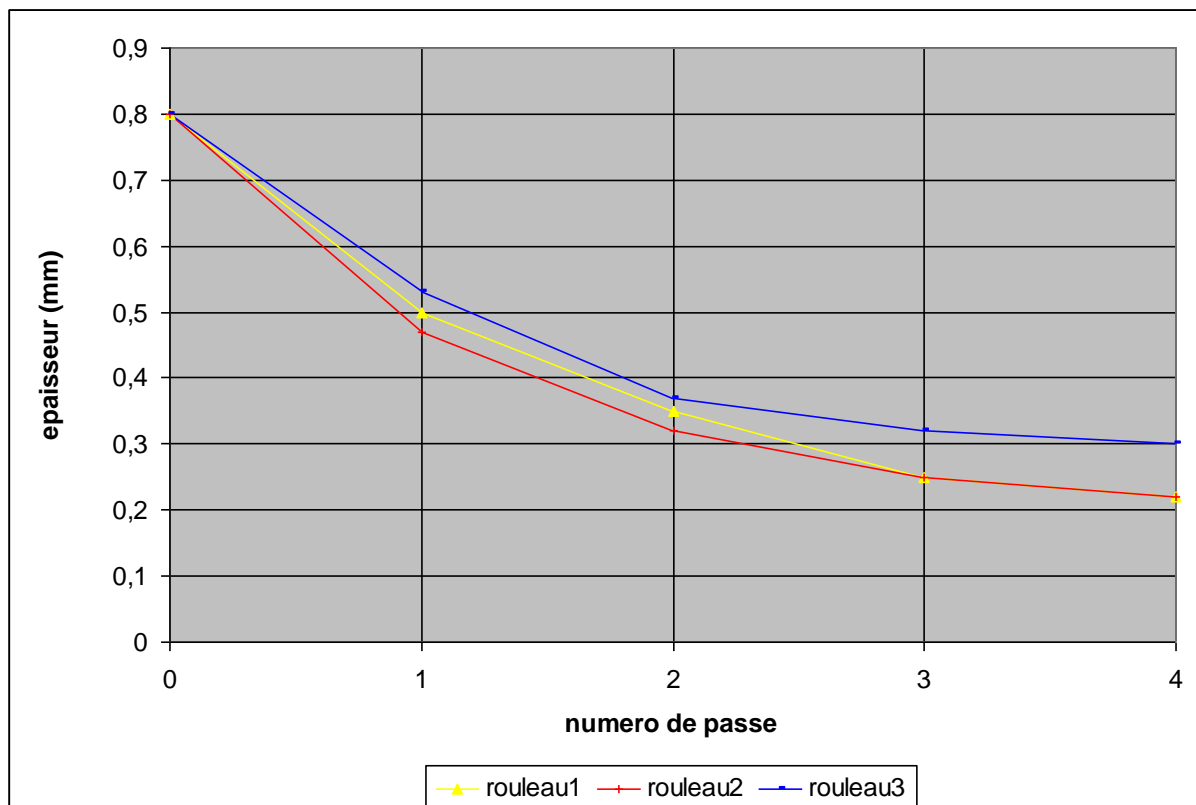


Fig. 18 Le calcul des plans de passes pour les 3 bandes d'acier

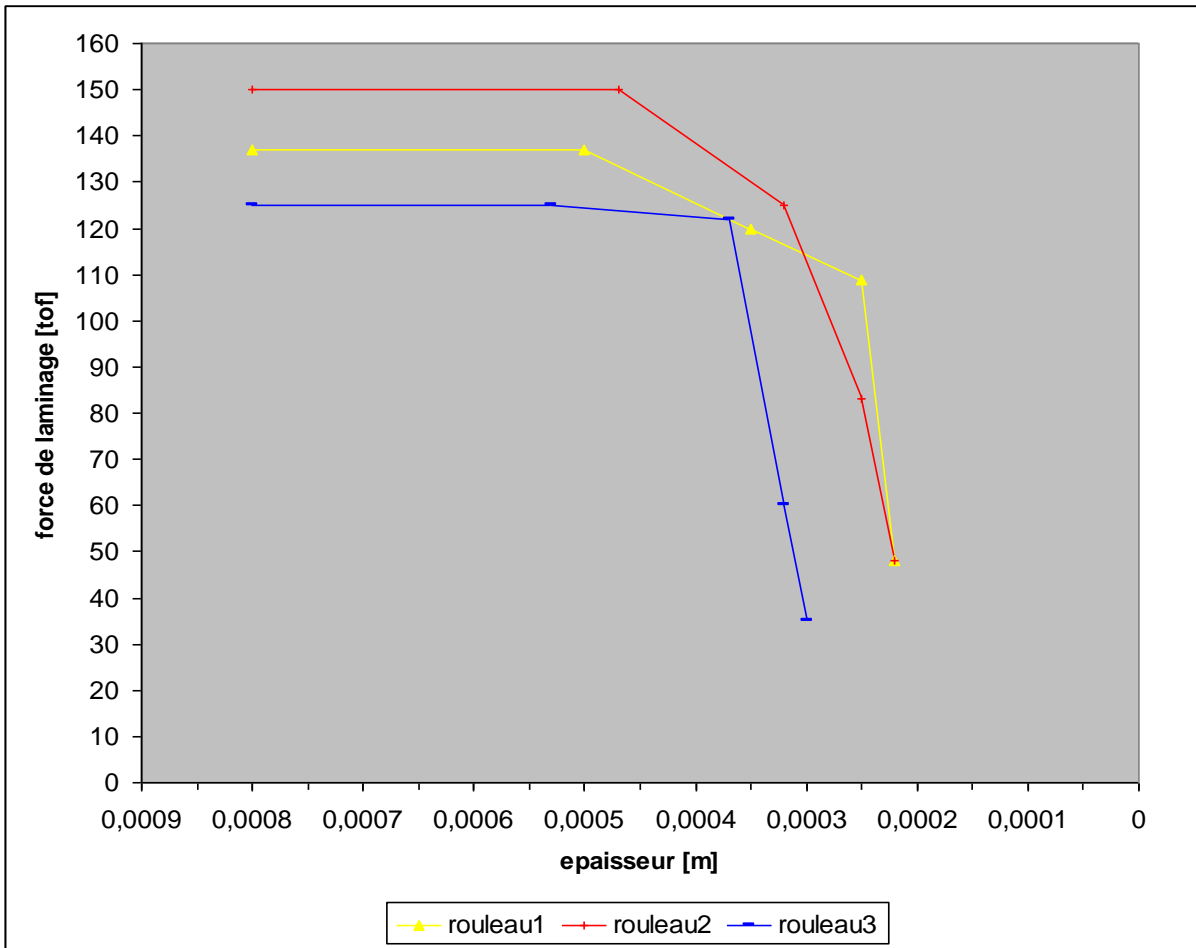


Fig. 19 Evolution de la force de laminage à chaque passe

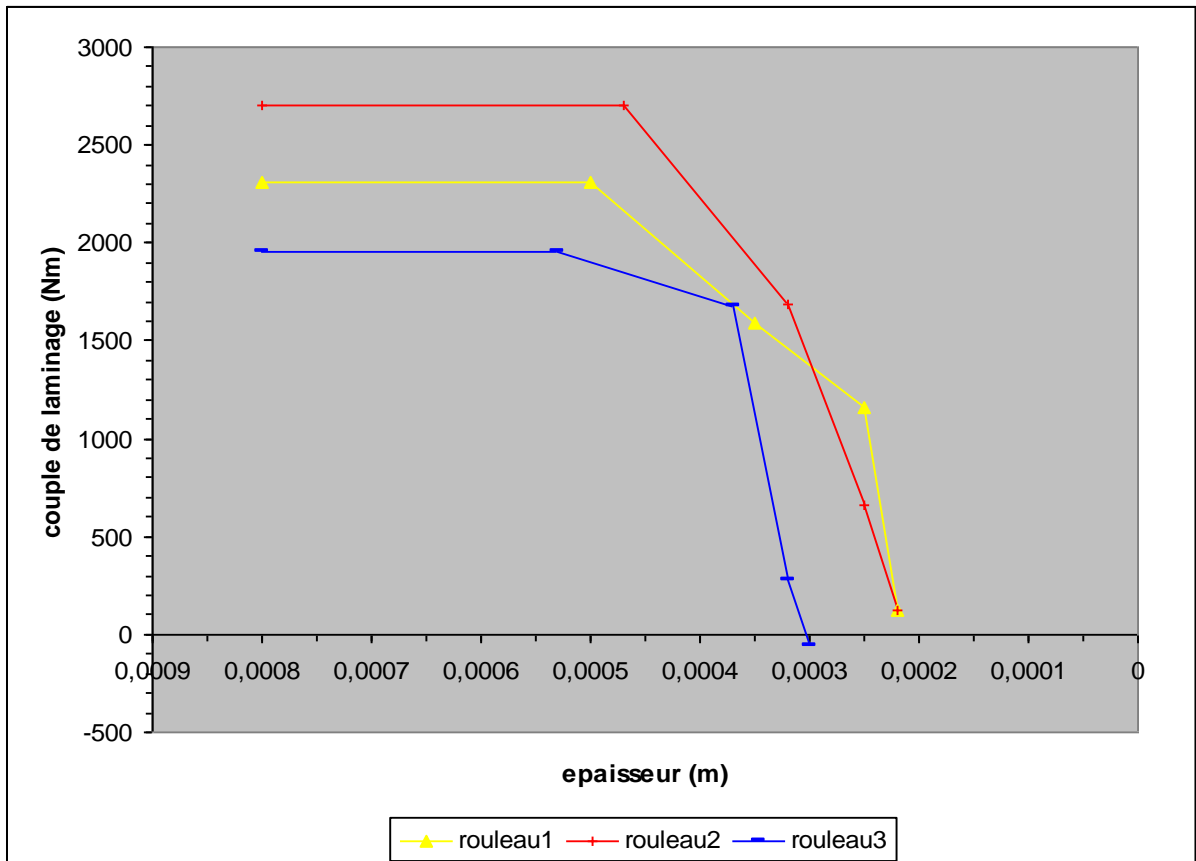


Fig. 20 Evolution du couple de laminage à chaque passe

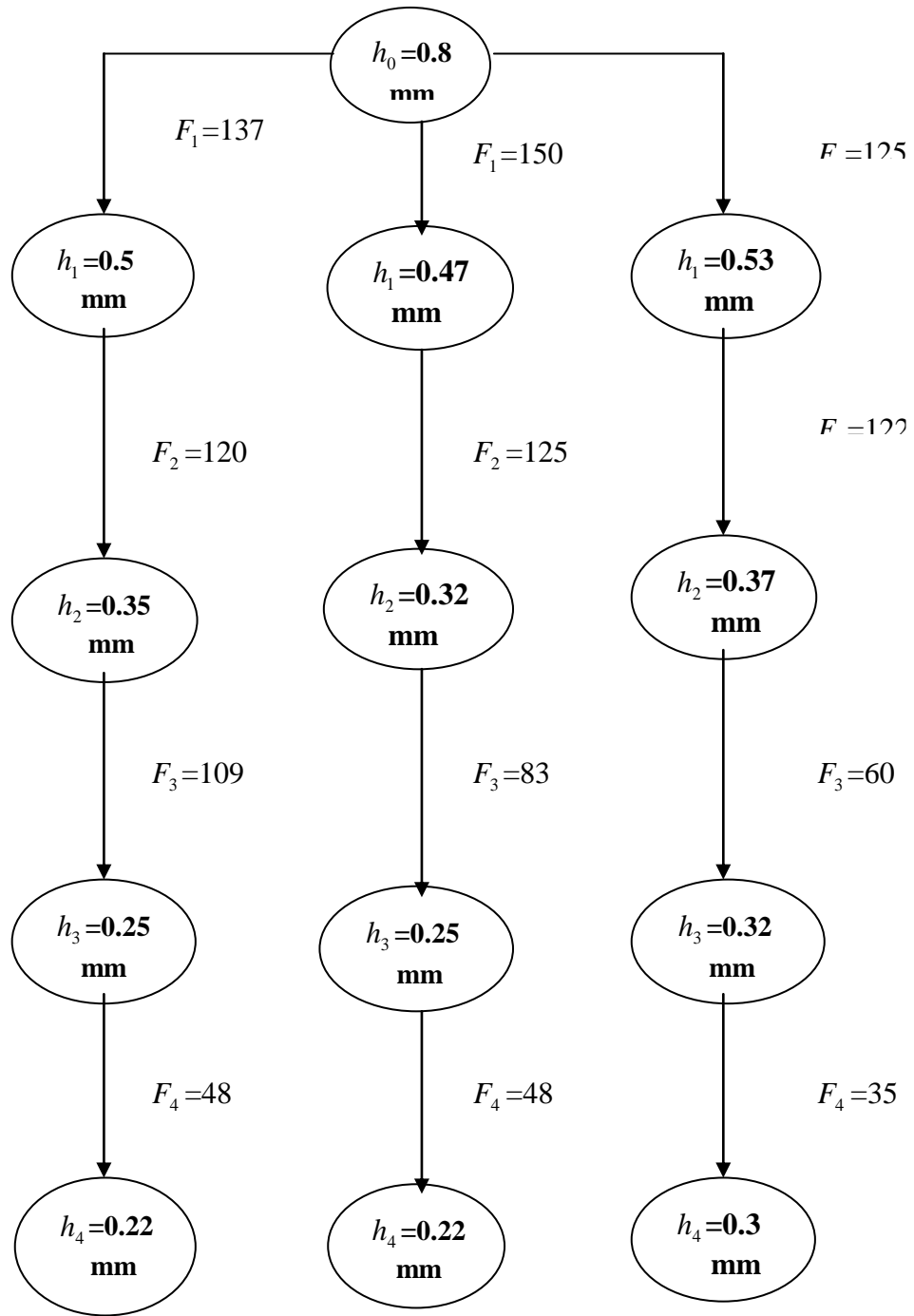


Fig. 21 Schema logique de calcul des forces et des épaisseurs à chaque passe

4.2 Le calcul du moment d'inertie J et de la puissance du moteur principal

Nous pouvons considérer comme étude de cas le calcul du moment d'inertie J et de la puissance du moteur principal pour le ROULEAU I en partant des données acquies du processus de laminage et des données fournies par le logiciel LAMIN pour ce passage. Le couple statique a été estimé, et les couples dynamiques seront calculés en tenant compte du moment du moment d'inertie J et des temps connexes de chaque étape. Les temps d'accélération et de freinage sont toujours les mêmes (parce que la vitesse en régime permanent et l'accélération et décélération de la ligne sont constantes $v=250\text{m/min}$, $\text{Acc}=\text{Dec}=5\text{m/min}\cdot\text{sec}$), mais les temps de fonctionnement en régime permanent sont différents parce qu'ils dépendent des rayons d'accélération et de freinage de la ligne (R_{ACC}, R_{DEC}). Dans la figure 22, nous avons un exemple de variation du couple, il croît quand le moteur accélère, et il baisse quand il freine:

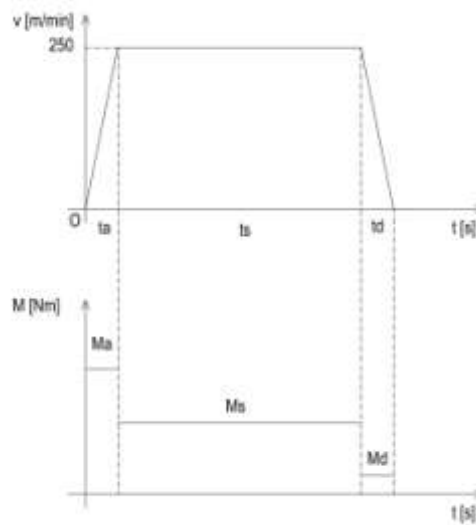


Fig. 22 Variation du couple pendant l'accélération, le fonctionnement en régime stationnaire et la décélération

Pour déterminer le couple dynamique, nous devons calculer le moment d'inertie des tous les cylindres que le moteur entraîne via le réducteur qui a le rapport de réduction $i=6.53$: deux cylindres de travail et deux d'appui.

Le moteur lui-même a un moment d'inertie; le moment d'inertie total sera:

$$J_{total} = J_{moteur} + J_{rap} \quad (4.1)$$

où

$$J_{rap} = \frac{J_{cyl}}{i^2} \quad (4.2)$$

et

$$J_{cyl} = 2J_{travail} + 2J_{appui} \quad (4.3)$$

On nous donne:

$$\rho = 7800\text{kg}/\text{m}^3$$

$$D_t = 150\text{mm} = 0.15\text{m} - \text{le diamètre des cylindres de travail}$$

$$D_a = 400\text{mm} = 0.4\text{m} - \text{le diamètre des cylindres d'appui}$$

$$l = 500\text{mm} = 0.5\text{m} - \text{la longueur des cylindres}$$

$$J_{travail} = J_t = \frac{7800\pi D_t^2}{4} l \frac{D_t^2}{4} \quad (4.4)$$

$$J_{travail} = J_t = \frac{7800\pi(0.15)^2}{4} 0.5 \frac{(0.15)^2}{4} = 0.3875kg.m^2$$

$$J_{appui} = J_a = \frac{7800\pi D_a^2}{4} l \frac{D_a^2}{4} \quad (4.5)$$

$$J_{appui} = J_a = \frac{7800\pi(0.4)^2}{4} 0.5 \frac{(0.4)^2}{4} = 19.595kg.m^2$$

$$J_{cyl} = 2J_t + 2J_a = 2*0.38 + 2*19.59 = 0.76 + 39.18 = 39.94kg.m^2$$

$$J_{rap} = \frac{J_{cyl}}{i^2} = \frac{39.94}{42.64} = 0.93kg.m^2$$

Pour $J_{moteur} = J_m = 3.4kg.m^2$ ainsi

$$J_{total} = J_m + J_{rap} = 3.4 + 0.93 = 4.33kg.m^2$$

Le couple dynamique sera:

$$M_d = M_s + J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.6)$$

$$v = \omega_t R_t \quad (4.7)$$

$v = 250m/min = 4.16m/s$ - la vitesse de la ligne

R_t - la rayonne du cylindre de travail

ω_t - la vitesse angulaire des cylindres de travail

$D_t = 150mm$ d'ou résulte $R_t = 75mm = 0.075m$

$$\omega_t = \frac{v}{R_t} = \frac{4.16}{0.075} = 55.46rad/s$$

La vitesse angulaire du moteur est: $\omega_{moteur} = \omega_m = \omega_t * i \quad (4.8)$

$$\omega_m = \omega_t * 6.53 = 55.46 * 6.53 = 362.15rad/s$$

Les couples statiques estimées avec le logiciel LAMIN sont:

Forté de laminare D:\LAMIN\LAMIN2.LM1

Curba de întarire

Tensiunea A: 20 kgf/mm²

Tensiunea B: 100 kgf/mm²

Exponentul: 0.8

Coef. frecare

	Coef. frecare	Forta kgf	Cuplul kgf.mm	Modul plastic kgf/mm
Trec 1	0.14	86.560	132.700	288.500
Trec 2	.14	154.700	240.500	773.600
Trec 3	0.14	65.880	36.340	1.318.000
Trec 4	0.14	48.360	12.340	1.612.000
Trec 5				

Date --> Calcul --> Date Iesire

$$M_{s1red} = 132.700 \text{kgf.mm} = 1327 \text{Nm}$$

$$M_{s2red} = 240.500 \text{kgf.mm} = 2405 \text{Nm}$$

$$M_{s3red} = 36.340 \text{kgf.mm} = 363 \text{Nm}$$

$$M_{s4red} = 12340 \text{kgf.mm} = 123 \text{Nm}$$

où M_{sired} - le couple estimé pour le passage i, après le réducteur

$$M_{si} = \frac{M_{sired}}{i} \text{ - les couples que le moteur doit développé} \quad (4.9)$$

$$M_{s1} = \frac{1327}{6.53} = 203 \text{Nm}$$

$$M_{s2} = \frac{2405}{6.53} = 368 \text{Nm}$$

$$M_{s3} = \frac{363}{6.53} = 55 \text{Nm}$$

$$M_{s4} = \frac{123}{6.53} = 19 \text{Nm}$$

Les calculs pour chaque passage:

Passage 1

$$M_{s1} = 203Nm$$

$$M_{a1} = M_{s1} + J_t \frac{d\omega}{dt} = 203 + 4.33 \frac{362.15}{41.6} = 234.36Nm$$

où dt est le temps d'accélération, égal avec le temps de décélération

$$dt = \frac{v}{A_{CC}} = \frac{v}{D_{EC}} = \frac{4.16}{0.1} = 41.6s$$

parce que

$$A_{CC} = D_{EC} = 5 \frac{m}{\text{min} * s} = \frac{5}{60} \frac{m}{s^2} \approx 0.1 \frac{m}{s^2}$$

$$M_{d1} = M_{s1} - J_t \frac{d\omega}{dt} = 203 - 4.33 \frac{362.15}{41.6} = 171.64Nm$$

où dt est le temps de décélération

Passage 2

$$M_{s2} = 368Nm$$

$$M_{a2} = M_{s2} + J_t \frac{d\omega}{dt} = 368 + 4.33 \frac{362.15}{41.6} = 399.36Nm$$

où dt est le temps d'accélération

$$M_{d2} = M_{s2} - J_t \frac{d\omega}{dt} = 368 - 4.33 \frac{362.15}{41.6} = 336Nm$$

où dt est le temps de décélération

Passage 3

$$M_{s3} = 55Nm$$

$$M_{a3} = M_{s3} + J_t \frac{d\omega}{dt} = 55 + 4.33 \frac{362.15}{41.6} = 86.36Nm$$

où dt est le temps d'accélération

$$M_{d3} = M_{s3} - J_t \frac{d\omega}{dt} = 55 - 4.33 \frac{362.15}{41.6} = 23.64Nm$$

où dt est le temps de décélération

Passage 4

$$M_{s4} = 19Nm$$

$$M_{a4} = 19 + 4.33 \frac{362.15}{41.6} = 50.36Nm$$

où dt est le temps d'accélération

$$M_{d4} = 19 - 4.33 \frac{362.15}{41.6} = -12.36Nm$$

où dt est le temps de décélération

Le couple équivalent est:

$$M_e^2 = \frac{1}{T_C} (M_{a1}^2 t_a + M_{s1}^2 t_{s1} + M_{d1}^2 t_d + M_{a2}^2 t_a + M_{s2}^2 t_{s2} + M_{d2}^2 t_d + M_{a3}^2 t_a + M_{s3}^2 t_{s3} + M_{d3}^2 t_d + M_{a4}^2 t_a + M_{s4}^2 t_{s4} + M_{d4}^2 t_d) \quad (4.10)$$

où

$$T_C = T_1 + T_{p1} + T_2 + T_{p2} + T_3 + T_{p3} + T_4 + T_{p4} - \text{le temps total du cycle} \quad (4.11)$$

$$T_1 = t_a + t_{s1} + t_d - \text{temps total du passage 1} \quad (4.12)$$

$$T_2 = t_a + t_{s2} + t_d - \text{temps total du passage 2} \quad (4.13)$$

$$T_3 = t_a + t_{s3} + t_d - \text{temps total du passage 3} \quad (4.14)$$

$$T_4 = t_a + t_{s4} + t_d - \text{temps total du passage 4} \quad (4.15)$$

$$t_a = t_d = 41.6s$$

$$T_{pi} = 0.05T_i - \text{temps de pause après le passage } i \quad (4.16)$$

Pour le passage 1 nous avons TH=0.0008m – l'épaisseur de référence

$$R_{AC} = 225mm = 0.225m$$

$$R_{FR} = 675mm = 0.675m$$

$$R_{ACC} = \sqrt{R_{AC}^2 + \frac{TH \cdot A_{CC}}{2\pi} \Delta t^2} - \text{le rayon d'accélération} \quad (4.17)$$

$$R_{ACC} = \sqrt{(0.225)^2 + \frac{0.0008 \cdot 0.1}{2\pi} (41.6)^2} = 0.27$$

$$R_{DEC} = \sqrt{R_{FR}^2 - \frac{TH}{2\pi D_{EC}} v^2} - \text{le rayon de freinage} \quad (4.18)$$

$$R_{DEC} = \sqrt{(0.675)^2 - \frac{0.0008}{2\pi \cdot 0.1} (4.16)^2} = 0.434$$

et à l'aide de la relation

$$t_s = \left| R_{ACC}^2 - R_{DEC}^2 \right| \frac{\pi}{TH \cdot v} \quad (4.19)$$

résulte

$$t_{s1} = 108.5s$$

Pour le passage 2 nous avons TH=0.0005m

$$R_{AC} = 225mm = 0.225m - \text{le rayon d'accélération}$$

$$R_{FR} = 675mm = 0.675m - \text{le rayon de freinage}$$

$$R_{ACC} = \sqrt{0.225^2 + \frac{0.0005 \cdot 0.1}{2\pi} (41.6)^2} = 0.254$$

$$R_{DEC} = \sqrt{0.675^2 - \frac{0.0005}{2\pi \cdot 0.1} (41.6)^2} = 0.665$$

et si on applique la relation (4.18) résulte:

$$t_{s2} = 569s$$

Pour le passage 3 nous avons TH=0.0003m

$$R_{AC} = 225mm = 0.225m - \text{le rayon d'accélération}$$

$$R_{FR} = 675mm = 0.675m - \text{le rayon de freinage}$$

$$R_{ACC} = \sqrt{0.225^2 + \frac{0.0003 \cdot 0.1}{2\pi} (41.6)^2} = 0.241$$

$$R_{DEC} = \sqrt{0.675^2 - \frac{0.0003}{2\pi \cdot 0.1} (41.6)^2} = 0.668$$

et conformément à la relation (4.18) résulte:

$$t_{s3} = 976s$$

Pour le passage 4 nous avons TH=0.00025M

$$R_{ACC} = \sqrt{0.225^2 + \frac{0.00025 \cdot 0.1}{2\pi} (41.6)^2} = 0.240$$

$$R_{DEC} = \sqrt{0.675^2 - \frac{0.00025}{2\pi \cdot 0.1} (41.6)^2} = 0.669$$

en appliquant la relation (4.18) résulte:

$$t_{s4} = 1175s$$

Si nous revenons dans les relations pour le temps total pour chaque passage on obtient:

$$T_1 = t_a + t_{s1} + t_d = 41.6 + 108.5 + 41.6 = 191.7s$$

$$T_2 = 41.6 + 569 + 41.6 = 652.2s$$

$$T_3 = 41.6 + 976 + 41.6 = 1059.2s$$

$$T_4 = 41.6 + 1175 + 41.6 = 1258.2s$$

Et les temps de pause après chaque passage sont:

$$T_{p1} = 0.05 \cdot 191.7 = 9.58s$$

$$T_{p2} = 0.05 \cdot 652.2 = 32.61s$$

$$T_{p3} = 0.05 \cdot 1059.2 = 53s$$

$$T_{p4} = 0.05 \cdot 1258.2 = 63s$$

Le temps total du cycle est:

$$T_C = 191.7 + 9.58 + 652.2 + 32.61 + 1059.2 + 53 + 1258.2 + 63 = 3319.5s$$

$$\frac{1}{T_C} = 0.0003$$

Le couple équivalent:

$$M_e^2 = 0.0003(54924 \cdot 41.6 + 41209 \cdot 108.5 + 29460 \cdot 41.6 + 159488 \cdot 41.6 + 135424 \cdot 569 + 112896 \cdot 41.6 + 7458 \cdot 41.6 + 3025 \cdot 976 + 559 \cdot 41.6 + 2536 \cdot 41.6 + 361 \cdot 1175 + 152.8 \cdot 41.6) = 30057.275$$

$$M_e = \sqrt{30057.275} = 173.4Nm$$

La puissance du moteur:

$$P = M_e \cdot \omega_m \quad (4.20)$$

d'où résulte

$$P = 173.4 \cdot 362.15 = 62797W = 62.797KW \approx 63KW$$

CHAPITRE 5

Commande sequentielle du processus de laminage a froid des tôles d'acier

5.1 Introduction

Les tôles minces d'acier ou d'aluminium se produisent dans les laminoirs réversibles. Celles unités de production sont considérés petites ou moyennes en comparaison avec les laminoirs continus qui sont des unités grandes de production. En consequence les laminoirs réversibles pour les tôles minces sont nombreuses et en plein développement spécialement en Asie. Les laminoirs roumaines sont confrontés avec les défis concurrentielles selon les critères de qualité, productivité et consommation énergétique. En present le procès de production des tôles minces se developpe en grande mesure sur un moyen euristique. Le produit finit qui doit être obtenu selon les paramètres qualitatifs imposés se réalise en réduisant l'épaisseur initiale et en effectuant un certain nombre de passes de laminage. L'établissement du numéro de passes et de la réduction de l'épaisseur obtenue à chaque passe représente un problème d'optimisation.

Pour obtenir une tôle d'épaisseur finale h_f en partant de la matière prime avec l'épaisseur initiale h_0 se réalise par N passes succesifs, à chaque passe on obtient la réduction d'épaisseur Δh_i . Les valeurs de commande du processus sont: la vitesse de laminage v_i , la tension T_i dans la bande et la distance s_i entre les cylindres. Pour une réduction d'épaisseur Δh_i correspond une réduction de la distance entre les cylindres Δs_i .

$$\Delta s_i = s_{i-1} - s_i \quad (5.1)$$

$$\Delta h_i = h_{i-1} - h_i \quad (5.2)$$

Pendant le procès de laminage se developpe une force de laminage f_i et le couple de laminage c_i , respectivement la puissance:

$$w_i = c_i \Omega_i \quad (5.3a)$$

$$w_i = f_i v_i \quad (5.3b)$$

Dans la pratique du laminage à froid on doit définir une grandeur nommé module de plasticité de l'acier:

$$m_i = \frac{f_i}{\Delta h_i} \quad (5.4)$$

Cettes grandeurs sont globales (caractérise le comportement global du processus de laminage), étant mesurables avec les capteurs. Le procès de déformation peut être décrit analytiquement par les grandeurs locales qui décrivent localement „l'écoulement” du matériel pendant la déformation plastique. Le modèle analytique fournit les grandeurs globales par l'intégration des équations qui décrivent le comportement local du matériel.

La conduite du procès de laminage réside essentiellement dans l'établissement de la réduction de l'épaisseur Δh_i qui suit à être obtenue à la passe i . Cette réduction s'obtient par la commande Δs_i . La succession des réductions Δh_i est essentielle pour les microstructures des tôles d'acier et détermine les propriétés mécaniques et technologiques du produit fini. Cette analyse se réalise par la méthode de l'élément fini (FEM) conformément à la théorie actuelle du laminage hydrodynamique. Dans les nouvelles conditions le laminage par des méthodes euristiques est complètement dépassé.

On présente 3 stratégies euristiques pour l'obtention de la tôle d'acier d'épaisseur $h_f = 0.3mm$ en partant de l'épaisseur initiale $h_0 = 0.8mm$.

Conformément à la première stratégie le laminage se développe en 4 passes pendant que pour les autres deux stratégies on utilise 3 passes. On peut définir les indicateurs de qualité suivants:

- Le critère de l'énergie minimale:

$$J_1 = \sum_{i=1}^N \Delta s_i^2 \quad (5.5)$$

- Le critère de l'erreur quadratique minimale:

$$J_2 = (h_f^* - h_f)^2 \quad (5.6)$$

- Le critère du temps minimal qui correspond au numéro minimal de passes
- Le critère de la force minimale:

$$J_4 = \sum_{k=1}^N f_k \quad (5.7)$$

- Le critère de la puissance minimale:

$$J_5 = \sum_{k=0}^N f_k v_k \quad (5.8)$$

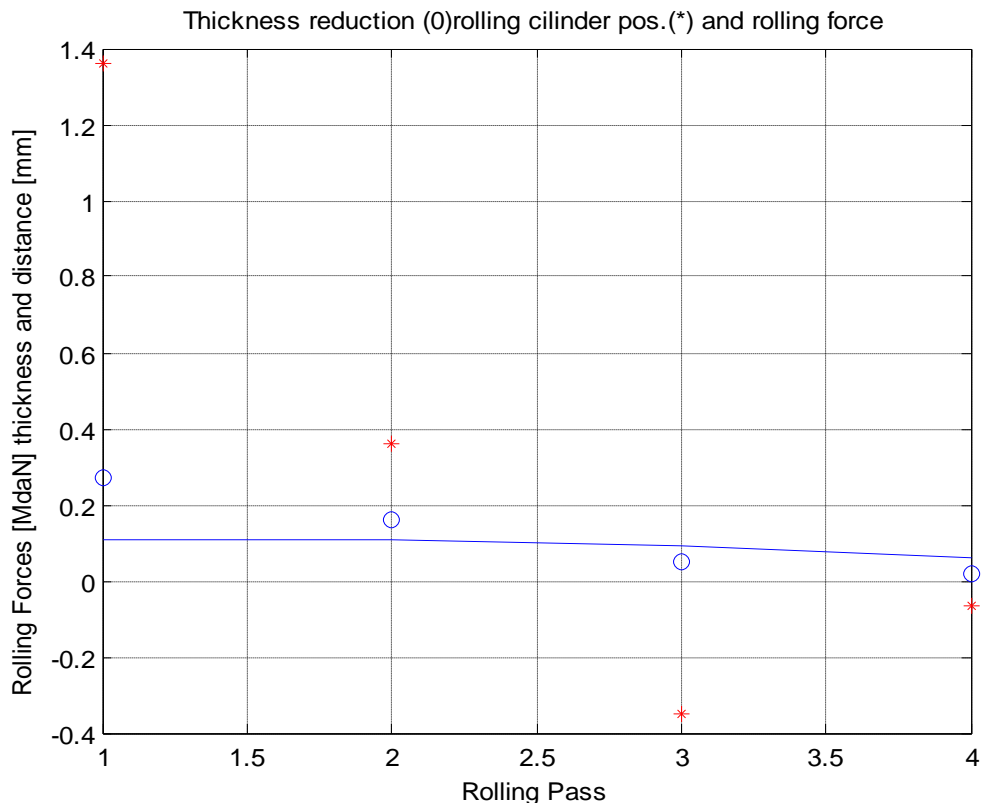
Tableau 2

Stratégie de commande	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	m_f [KdaN/mm]
1	2.015	0	4	375	25375	3250
2	1.664	0	3	275	18125	1062
3	2.54	0.01	3	322	21750	1583

Dans le tableau 1 on a passé les valeurs des indicateurs de performance pour les trois stratégies de commande analysées. A une première vue la deuxième est la meilleure. Cette appréciation est pas complète parce que on n'a pas considéré les effets des réductions sur la microstructure de l'acier. Si la réduction est plus grande l'écoulement plastique du matériel pendant le laminage devient moins homogène avec des effets négatifs pour la structure de l'acier.

Une propriété importante de la bande laminée à froid est la résistance à la déformation. On dit que dans les trois cas analysés dans le tableau 1 on a utilisé des rouleaux (matière prime) d'une même qualité. Après le laminage on a obtenu des bandes avec des qualités mecaniques différents.

La bande nr. 1 a une résistance grande à la déformation à cause d'écrouissage (ont été effectués 4 passes). La bande nr.2 a une résistance petite à la déformation (corrélé avec J_1 et J_5 petits). La bande nr.3 a une résistance moyenne à la déformation (J_1 grand mais un numéro petit de passes).



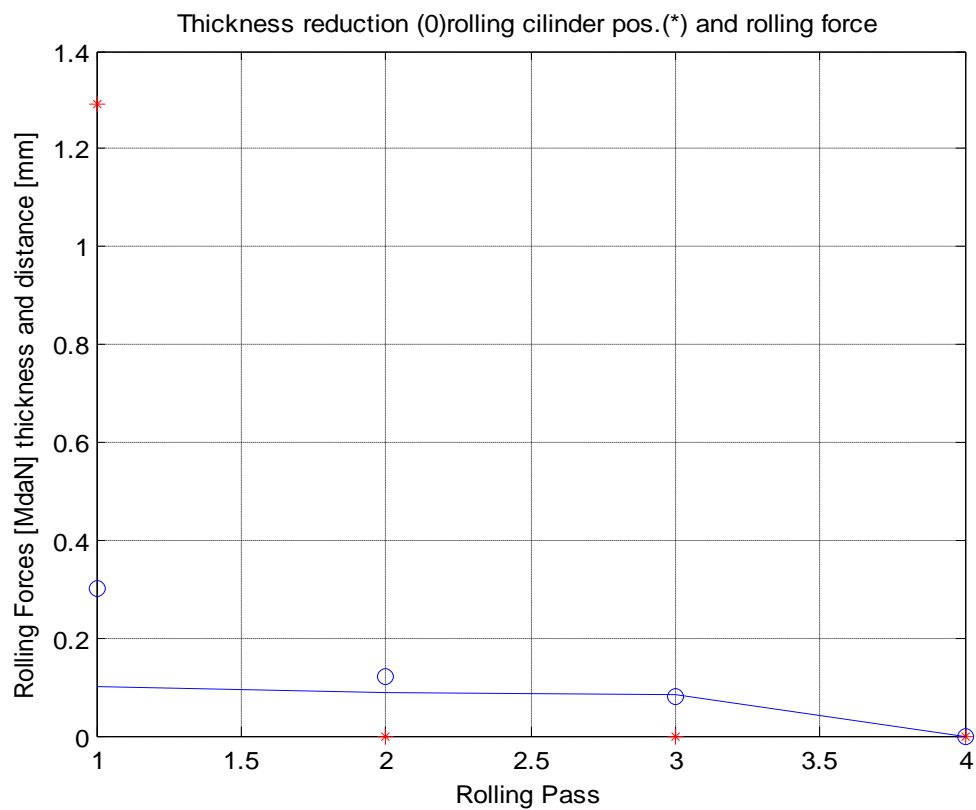
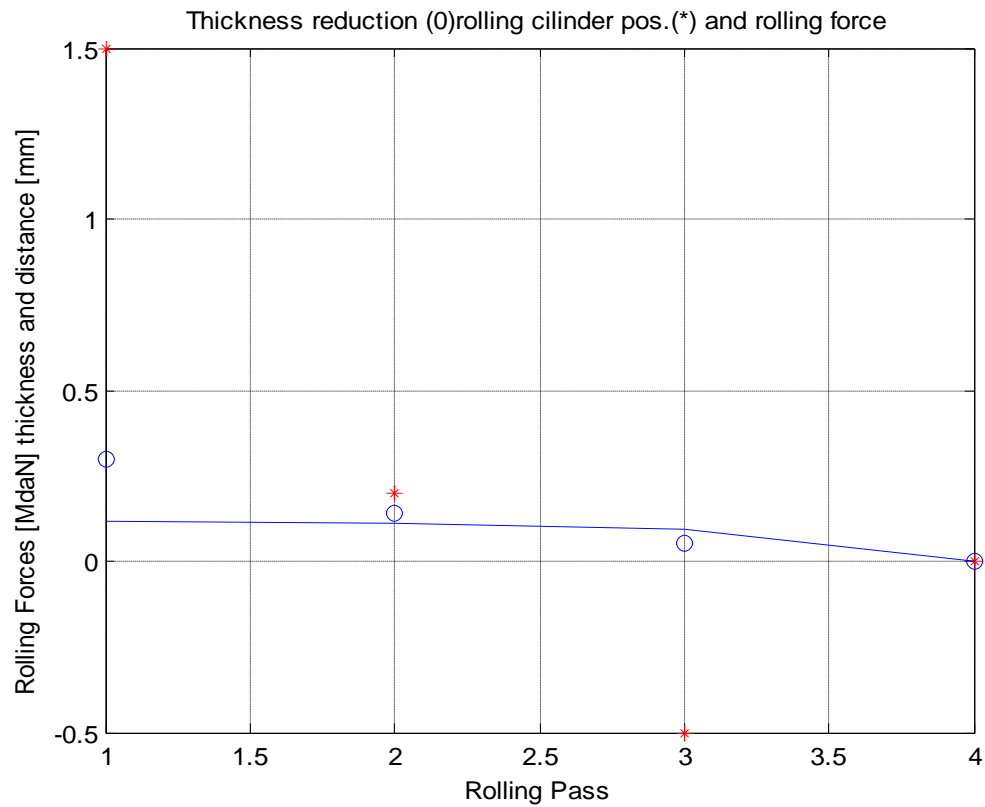


Fig. 23 Les diagrammes pour les 3 stratégies de commande du processus de laminage des bandes avec l'épaisseur initiale de 0.8 mm et l'épaisseur finale imposée de 0.3mm. Les résultats obtenus sont passés dans le tableau 2

5.2 Le laminage à froid vu comme procès conduit

La commande sequentielle du laminage se réalise par les grandeurs de commande Δs_i , v_i et T_i . La grandeur principale de sortie est Δh_i , les grandeurs auxiliaires étant la force f_i et le couple de laminage m_i .

Si nous négligeons l'effet de la tension dans la tôle on obtient le modèle suivant du processus:

$$\Delta h_i = \frac{m_{i-1}}{m_i + M} \Delta h_{i-1} + \frac{M}{m_i + M} \Delta s_{i-1} \quad (5.9)$$

où M est le module d'élasticité de la cage.

La solution libre de l'équation (5.7) dans les conditions dans lesquelles $\Delta h_1 > 0$ et $\Delta s_i = 0, i=2,3 \dots N$ résulte de l'équation:

$$\Delta h_i = \frac{m_{i-1}}{m_i + M} \Delta h_{i-1} \quad , i = 2,3 \dots N \quad (5.10)$$

où

$$\Delta h_1 = \frac{M}{m_1 + M} \Delta s_0 \quad (5.11)$$

On obtient l'épaisseur finale en sommant les réductions Δh_i , $i = 2 \dots N$.

$$\sum_{i=2}^{\infty} \Delta h_i = \Delta h_1 \frac{A_1}{1 - A_1} \quad (5.12)$$

$$A_1 = \frac{m_1}{m_1 + M} < 1 \quad (5.13)$$

Le module de plasticité reste constant (on a négligé l'effet du phénomène d'écrouissage).

$$h_f = h_0 - \Delta h_1 \frac{1}{1 - A} \quad (5.14)$$

La solution libre de conduite est illustré dans la stratégie deuxième du fig. 1. Même si les passes 2 et les suivantes ont la commande $\Delta s_i = 0$, elles produisent des réductions d'épaisseur:

$$\Delta h_i = \Delta h_1 A^{i-1} \quad i = 2,3 \dots N \quad (5.15)$$

L'obtention de la solution générale suppose la prédiction du module de plasticité:

$$m_i = \frac{f_i}{\Delta h_i} \quad (5.16)$$

La formulation correcte de la problème est la suivante:

- On adopte par critères technologiques selon le modèle analytique le nombre de passes N et les réductions Δh_i $i = 1 \dots N$;
- Avec l'aide d'un modèle prédictif on obtient la force f_i en fonction de Δh_i ;
- On calcule le module de plasticité m_i ;
- De l'équation du procès (5.9) il résulte les grandeurs de commande Δs_i ;
- Après chaque passe on ajuste les paramètres du modèle prédictif;

5.3 Le modèle prédictif pour la force de déformation plastique avec l'aide d'une base des données experimentale (Data base model)

L'équation (5.7) du procès peut être écrite sous la forme:

$$x_k = A_{k-1} x_{k-1} + B_{k-1} u_{k-1} \quad (5.17)$$

où la réduction de l'épaisseur Δh est une grandeur d'état et la réduction de la distance entre les cylindres est une grandeur de commande.

La détermination de la commande optimale selon un critère donné est un problème classique. Les coefficients A_k, B_k ne sont pas constants.

$$A_k = \frac{m_k}{m_k + M}, B_k = \frac{M}{m_k + M} \quad (5.18)$$

Le module de plasticité m_k se modifie après chaque passe de laminage. A cause de ce motif il est nécessaire un modèle prédictif pour la force de laminage et implicitement pour m_k . On considère le problème d'optimisation des passes selon le critère (5.5)

$$J_1 = x_N + \sum_{k=0}^{N-1} u_k^2 \quad (5.19)$$

Le nombre des passes N est relativement petit ($N=3-5$). Du ce motif un calcul itératif est plausible. La solution classique d'optimisation s'obtient par programmation directe. Le calcul commence du $k = N-1$. On note avec S_{N-1} la valeur de l'indicateur J_1 de l'équation (5.19) au pas $N-1$.

$$S_{N-1} = \min(x_N^2 + u_{N-1}^2) \quad (5.20)$$

où conformement à l'équation d'état (5.17) on obtient

$$x_N = A_{N-1} x_{N-1} + B_{N-1} u_{N-1}$$

De la condition $\frac{\partial S_{N-1}}{\partial u_{N-1}} = 0$ s'obtient la commande optimale:

$$u_{N-1}^* = -\frac{A_{N-1} B_{N-1}}{1 + B_{N-1}^2} x_{N-1} \quad (5.21a)$$

respectivement

$$u_{N-1}^* = -K(A_{N-1}, B_{N-1})x_{N-1} \quad (5.21b)$$

Ca suppose qu'on a extrait de la base des données du modèle prédictif le module de plasticité m_{N-1} qui correspond à la dernière passe.

La deuxième itération de calcul suppose premièrement le calcul de la valeur optimale de l'indicateur S_{N-1} :

$$S_{N-1}^* = x_N^2 + (u_{N-1}^*)^2 \quad (5.22)$$

L'indicateur (19) au pas N-2 est:

$$S_{N-2}^* = \min(u_{N-2}^2 + S_{N-1}^*) \quad (5.23)$$

On pose la même condition de minim $\frac{\partial S_{N-2}}{\partial u_{N-2}} = 0$ de laquelle résulte la commande optimale

$$u_{N-2}^* = -\frac{A_{N-2}B_{N-2}A_{N-1}^2}{1 + B_{N-1}^2 + A_{N-1}^2B_{N-2}^2}x_{N-2} \quad (5.24)$$

Dans ce mode on obtient la séquence des grandeurs optimales sur la base du module m_k fournit par le modèle prédictif.

$$\begin{array}{c} m_{N-1}, \dots, m_{k'}, \dots, m_0 \\ \downarrow \dots \downarrow \dots \downarrow, \quad k' = \overline{N-1, 0} \\ u_{N-1}^*, \dots, u_{k'}^*, \dots, u_0^* \end{array} \quad (5.25)$$

Se change l'ordre des grandeurs de commande en succession directe:

$$u_0^*, \dots, u_k^*, \dots, u_{N-1}^*, \quad k = \overline{0, N-1} \quad (5.26)$$

Dans ce mode on a obtenu le programme de commande de la distance entre les cylindres de laminage. A chaque passe de laminage $k=0..N-1$, on obtient la réduction de l'épaisseur x_k , ainsi:

$$\sum_{k=0}^{N-1} x_k = x_0 - x_f \quad (5.27)$$

où x_0 est l'épaisseur initiale et x_f l'épaisseur finale. La structure du modèle prédictif pour la force de laminage adopté est basée sur un réseau neuronale RBF (Radial Basis Functions). Le réseau neuronale a deux grandeurs d'entrée: x_k, x_{k-1} . La grandeur de sortie est la puissance de déformation $p_k = f_k v_k$.

Les résultats les meilleurs s'obtiennent par le scalage de la puissance p_k en rapport avec les entrées x_k et x_{k-1} .

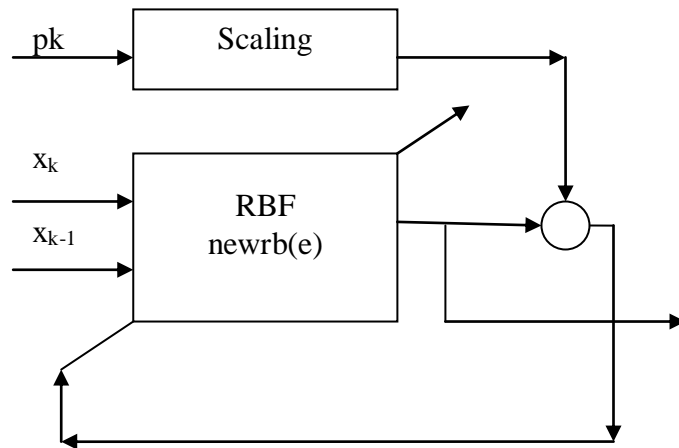


Fig. 24 La structure simplifié du reseau neuronale utilisé pour la prédiction du puissance de laminage

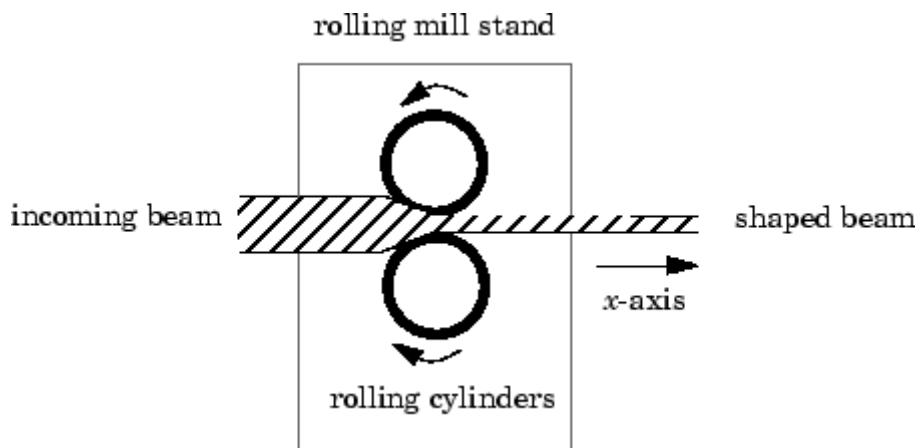
CHAPITRE 6

La simulation du processus de laminage

L'objectif du processus de laminage est de maintenir l'épaisseur de la bande sur les axes x et y dans les limites de tolérance qui assurent la qualité. Des variations dans l'épaisseur de sortie peuvent apparaître à cause des motifs suivants:

- des variations d'épaisseur dans la bande qui doit être laminée
- l'excentricité dans les cylindres de travail

Le réglage est nécessaire pour réduire l'effet de ces types des variations.



Parce que les variations ne peuvent être mesurés proche de la cage, le réglage se fera en mesurant la force de laminage.

Nous présentons le processus de laminage et sa régulation à l'aide de Matlab. Pour ça nous partirons du modèle existant: le modèle simulink du laminoir sur deux axes. Nous modifions ce schéma pour obtenir pour obtenir la structure qui représente précisément notre cas particulier.

Le but de la simulation est de maintenir constante la valeur de l'épaisseur de sortie d'une tôle laminée, en tenant compte des perturbations qu'apparaissent pendant le processus. Elles sont les suivantes:

- variation d'épaisseur d'entrée
- l'excentricité des cylindres

Le modèle initial est le suivant:

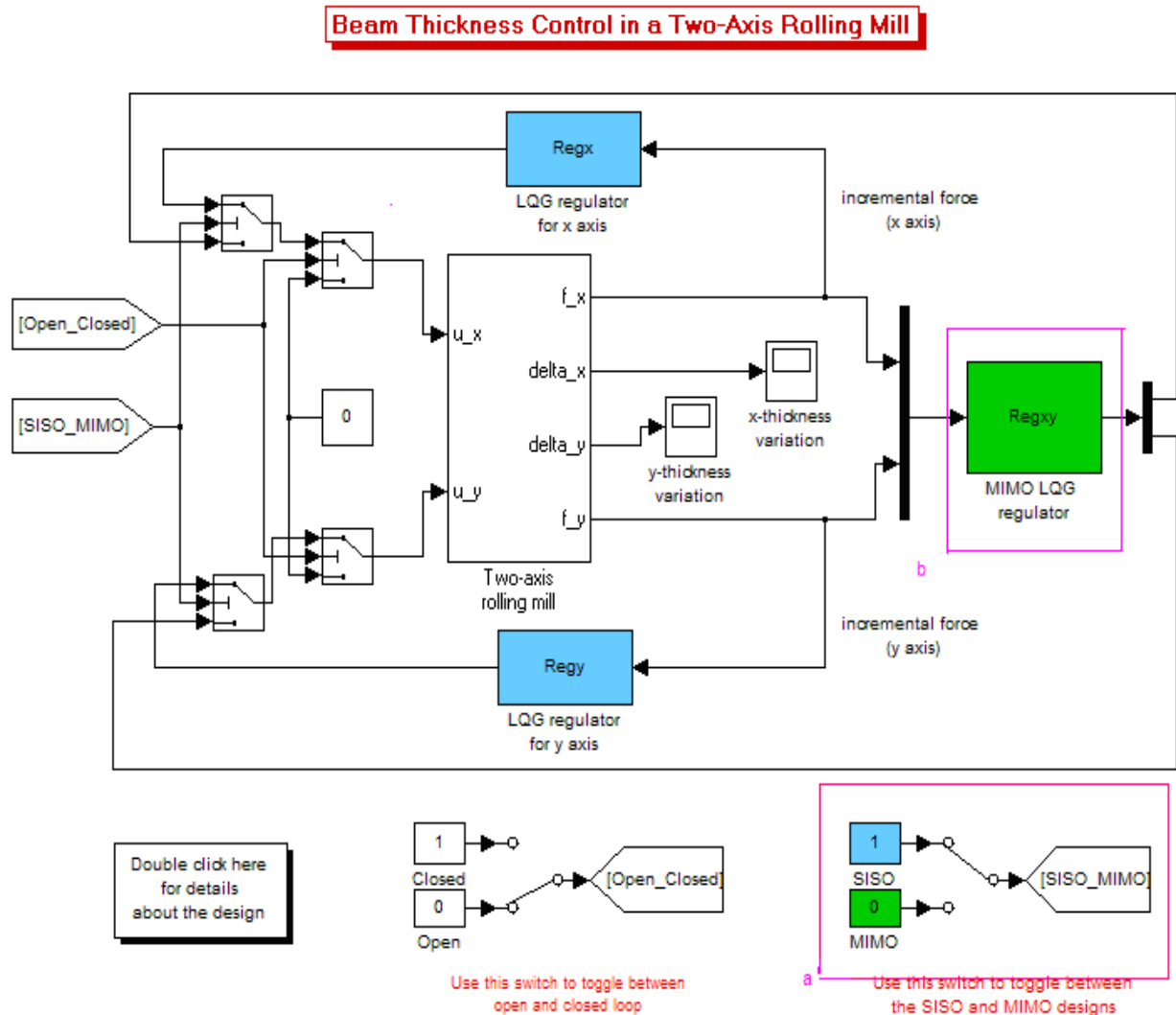


Fig. 25 Le schéma initial Simulink pour la régulation d'épaisseur des tôles d'acier

On peut observer la liaison entre les deux axes de laminage, les deux régulateurs pour les axes et les deux méthodes SISO et MIMO (Fig. 25.a).

Comme le laminoir modifie l'épaisseur sur une seule axe, x , nous n'avons pas besoin de la liaison entre les axes, parce que nous n'avons qu'un axe (Fig. 26.a).

Les deux axes du modèle initial s'influencent réciproquement, dont il est nécessaire d'un régulateur Regxy pour corriger la commande pour l'axe x en fonction des paramètres d'axe y, et inversement. Comme nous n'avons pas qu'un axe, la liaison n'est pas nécessaire, et le régulateur Regxy n'est pas nécessaire aussi (Fig 25.b).

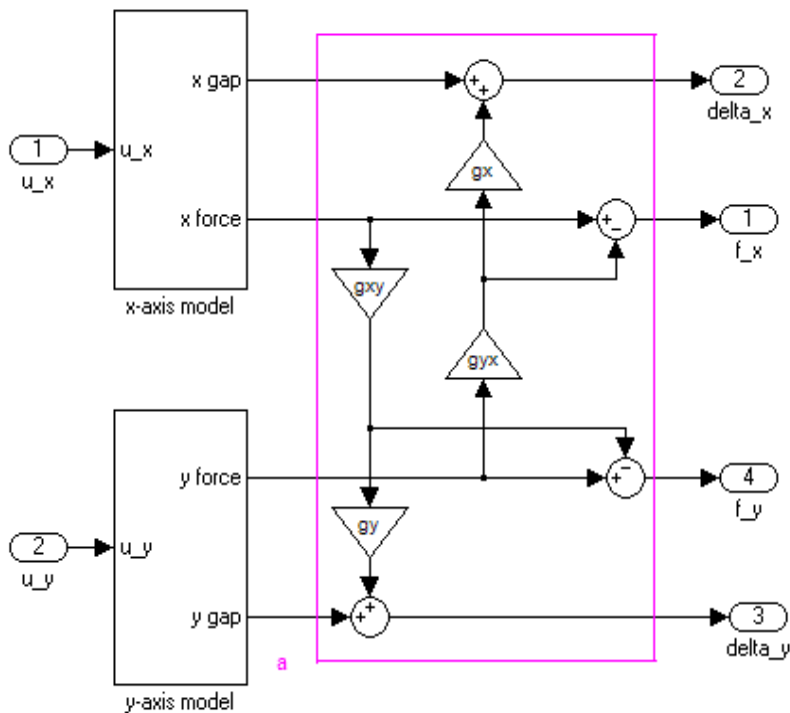


Fig. 26 Modèle Two-axis rolling mill

Observons deux modèles du laminoir: un pour l'axe x, et un modèle pour l'axe y; nous modifions ces modèles, ainsi que le modèle pour l'axe x sera le modèle du processus avec l'excentricité des cylindres de travail, et le modèle pour l'axe y sera le modèle sans excentricité (Fig. 27 et 28 respectivement).

Le modèle avec excentricité x est représenté par le schéma suivant:

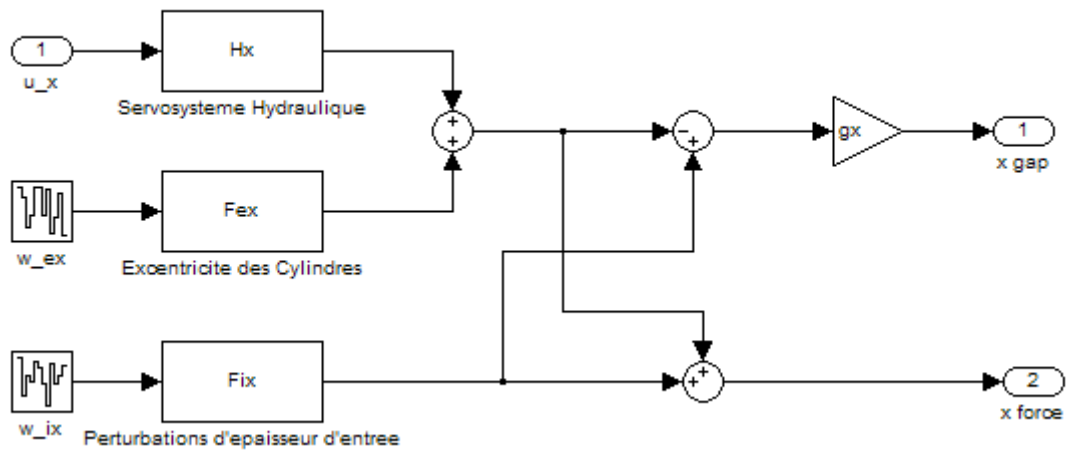


Fig. 27 Le modèle du processus avec excentricité

Le modèle sans l'excentricité y se représente comme suit:

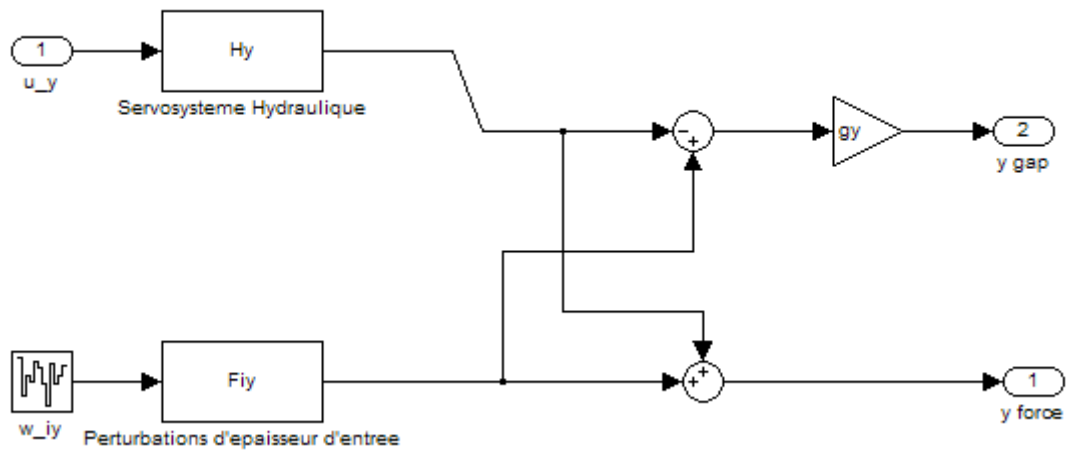


Fig. 28 Le modèle du processus sans excentricité

Maintenant nous avons les deux modèles individuelles du processus, avec un régulateur de type LQG pour chaque modèle.

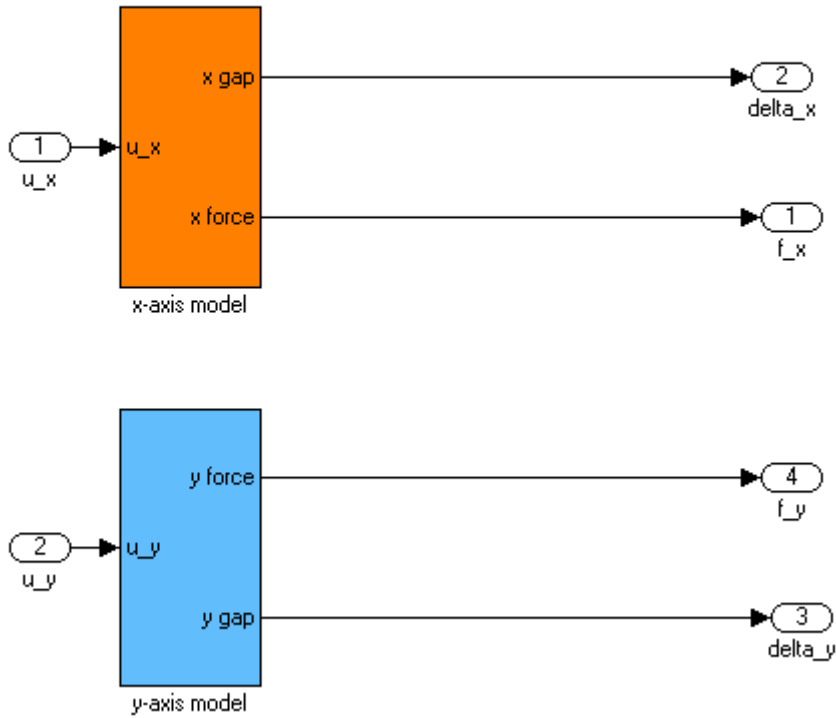


Fig. 29 Les modèles avec (x) et sans excentricité (y)

Le schéma Simulink pour la simulation en boucle ouverte

Le schema proposé pour la simulation en boucle ouverte a la forme:

La regulation d'epaisseur des toles d'acier en mesurant la force de laminage

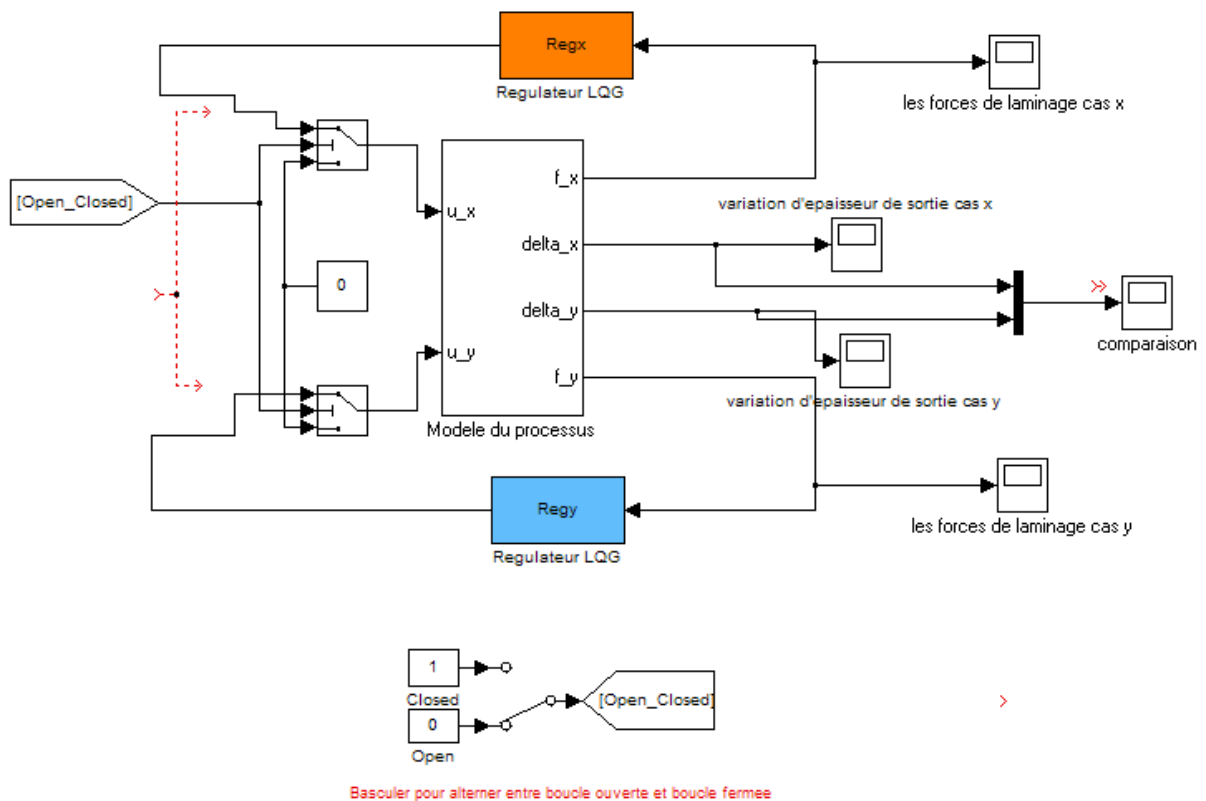


Fig. 30 Le schéma Simulink en boucle ouverte pour la régulation d'épaisseur des tôles d'acier

Avec le basculeur nous pouvons choisir le type de réglage, en boucle fermée ou en boucle ouverte, pour comparer les résultats.

Dans ce premier cas, pour le schéma x et y, nous avons:

- x en boucle ouverte
- y en boucle ouverte

Maintenant nous pouvons simuler le processus de laminage, et nous pouvons comparer les effets des régulateurs en roulant la simulation en boucle ouverte, avec ou sans l'excentricité des cylindres.

Les résultats de la simulation en boucle ouverte:

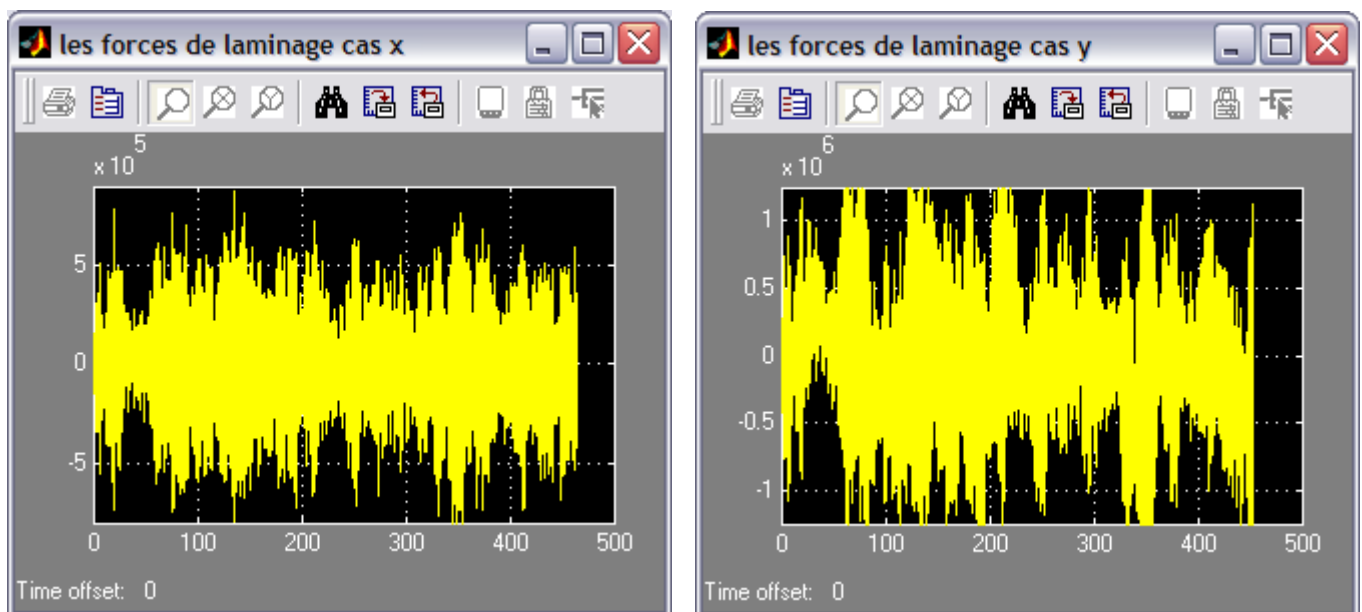


Fig. 31 La variation de la force de laminage en boucle ouverte

Cas x – cas du modèle avec excentricité

Cas y – cas du modèle sans excentricité

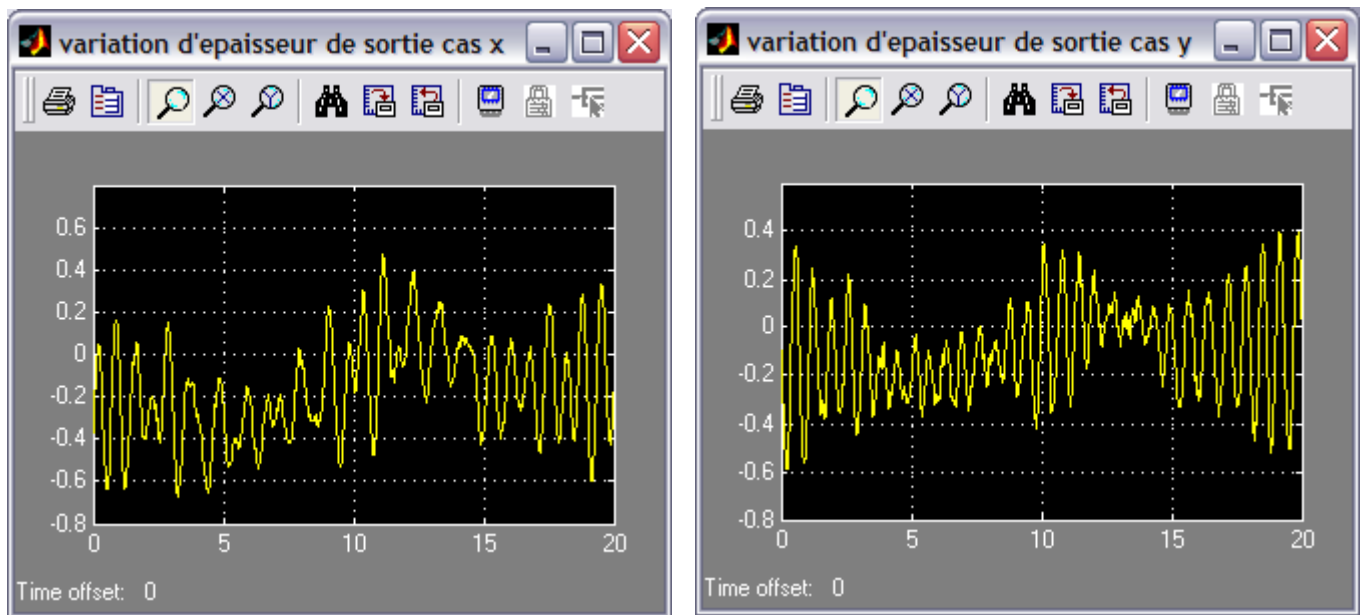


Fig. 32 La variation d'épaisseur de sortie en boucle ouverte

On peut observer quelques déviations: pour le cas x la valeur maximale de la variation d'épaisseur de sortie est environ 0.5 et pour le cas y la valeur est environ 0.4. Le modèle avec l'excentricité reçoit plus des perturbations que le modèle qui n'a que des perturbations d'épaisseur d'entrée du matériau.

Pour mettre en évidence l'impact des perturbations de l'excentricité, nous représentons les épaisseurs de sortie sur un seul graph:

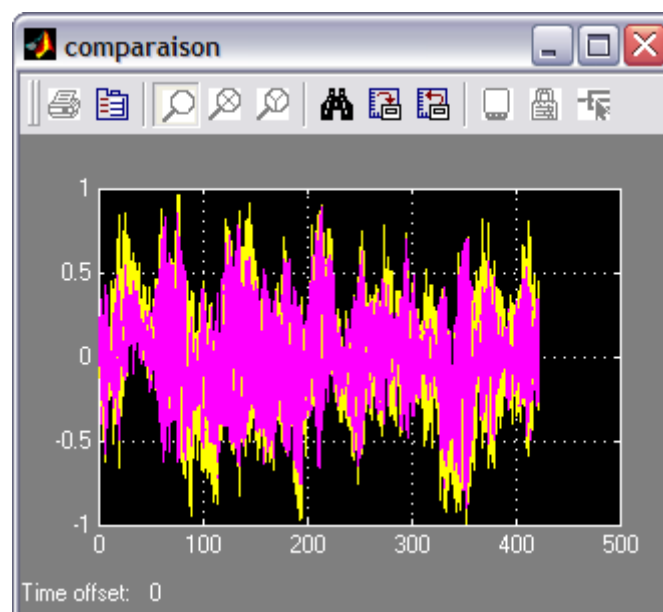


Fig. 33 Comparaison d'épaisseurs

Le schéma Simulink pour la simulation en boucle fermée

La regulation d'epaisseur des toles d'acier en mesurant la force de laminage

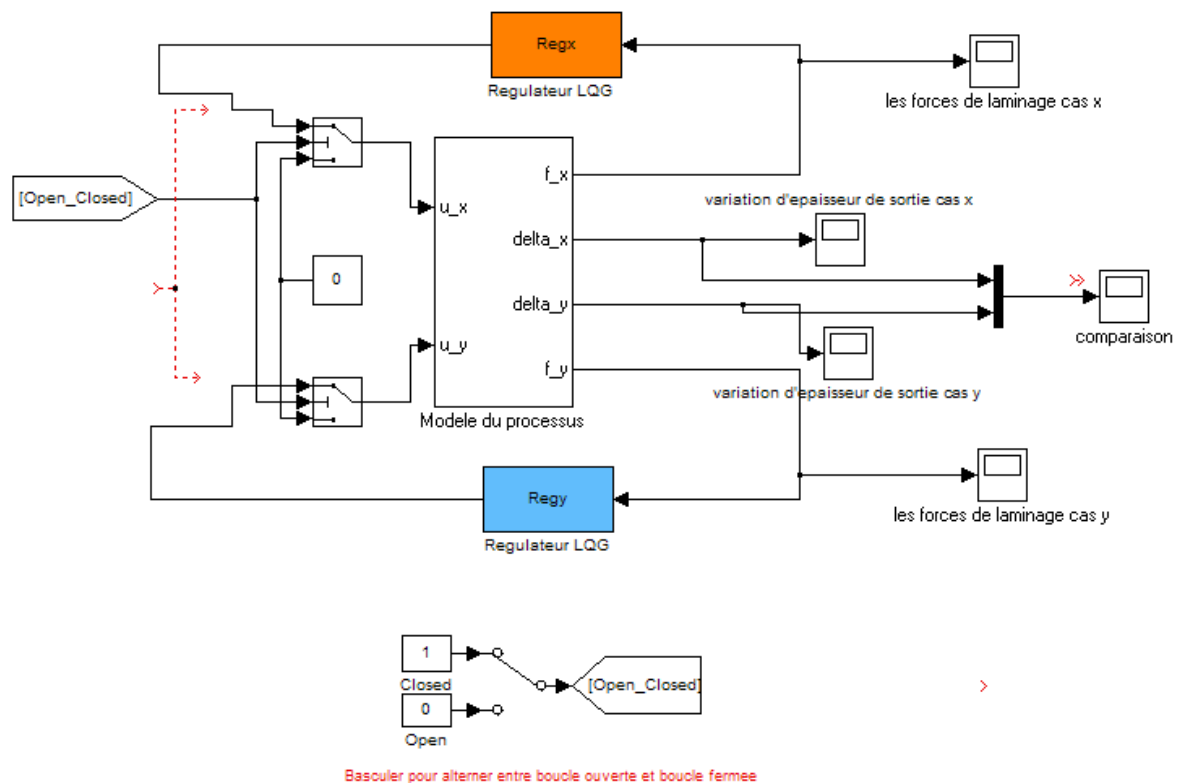


Fig. 34 Le schéma Simulink en boucle fermée pour la régulation d'épaisseur des tôles d'acier
 Dans ce deuxième cas, pour le schéma x et y nous avons:

- x en boucle fermée
- y en boucle fermée

Les résultats de la simulation en boucle fermée:

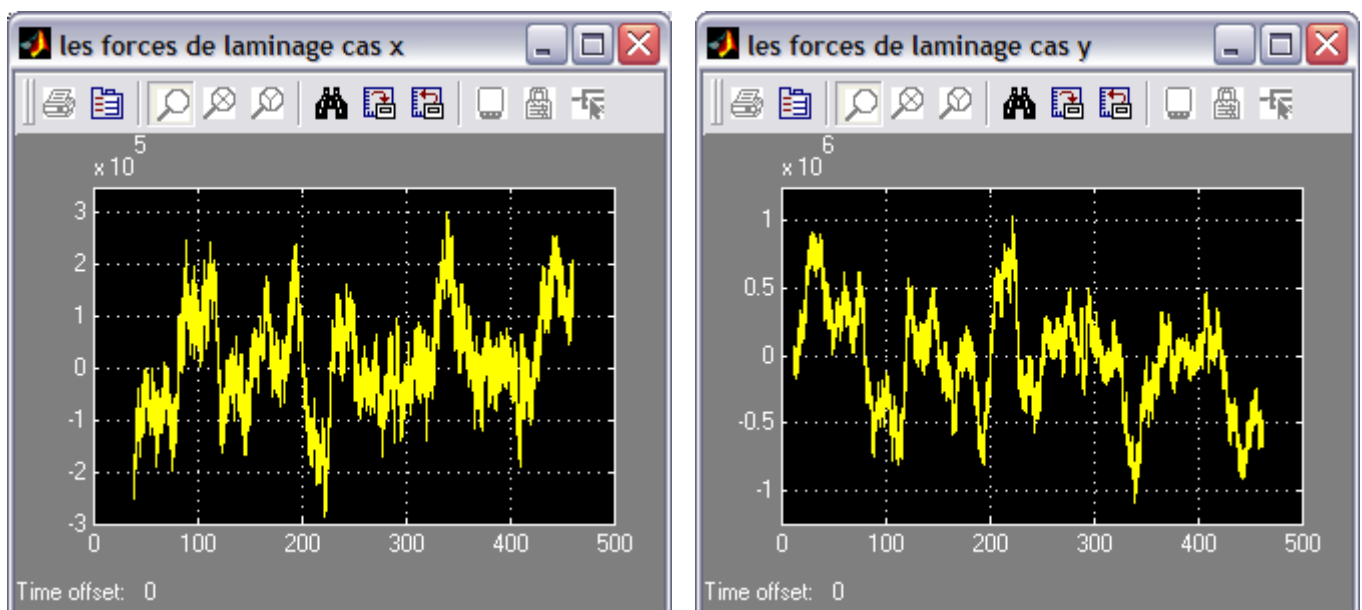


Fig. 35 La variation de la force de laminage en boucle fermée

Cas x – cas du modèle avec excentricité
Cas y – cas du modèle sans excentricité

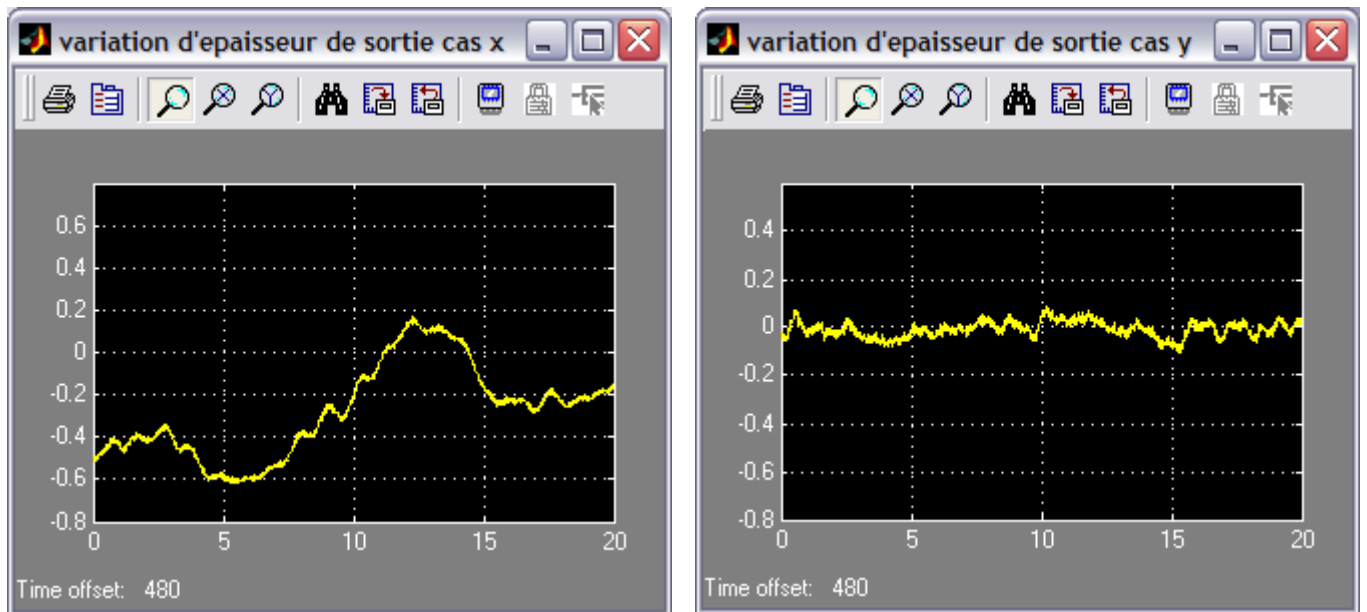


Fig. 36 La variation d'épaisseur de sortie en boucle fermée

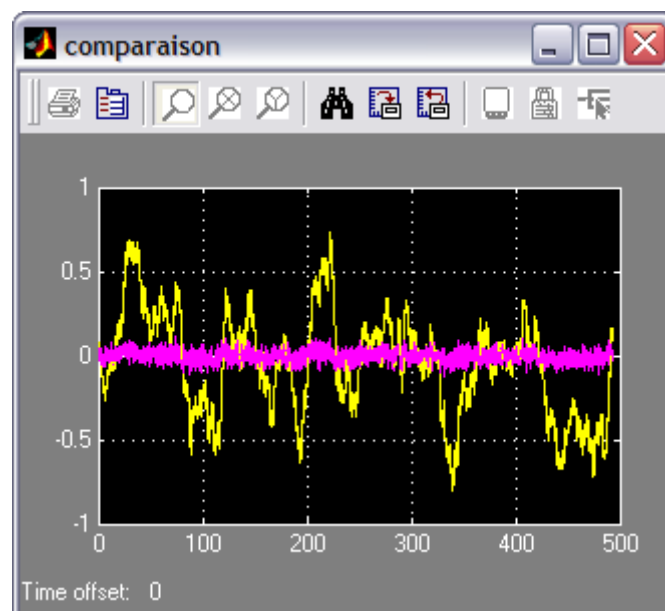


Fig. 37 Comparaisons d'épaisseurs, en jaune le cas x, en rose le cas y

CHAPITRE 7

L'analyse économique des moyens de régulation proposés

Les dépenses faites par une entreprise pour la fabrication des produits portent le nom de dépenses de production.

Les dépenses de production dans un laminoir sont composés par: le cout de matière prime, respectivement du metal consommé, le cout du combustible, de l'énergie électrique, l'amortissement de l'outillage, les couts pour l'implémentation d'un software adequat pour conduire le processus métallurgique.

Il y a plusieurs logiciels software qui peuvent être utilisées, en comprenant ici des logiciels de modélisation des passes, des logiciels de prédiction du couple et de la force de laminage, logiciels pour la prédiction de la mycrostructure etc.

Une fois avec le développement du Microsoft.Net, le développement des logiciels web a devenu plus pratique et peut être utilisé comme tous les applications Windows. Dans l'environnement web le transfert des données, le management de la mémoire peuvent être gètionnés par un serveur web, dont l'accès est gratuit.

Un logiciel web pour laminoirs est facilement à utiliser; il peut être accèssé:

- partout: au bureau, au travail
- toujours: un website est toujours disponible
- par chacun: connecté par un login et un mot de passe chacun peut travailler au projet
- avec une période courte d'apprentissage: presque tous les utilisateurs ont une expérience sur l'internet.

Quelques logiciels qui supposent l'utilisation de l'environnement web pour le laminage:

1. Roll Pass Design – pour chaque essai le système mesure l'allongement, la vitesse de laminage et les autres paramètres critiques. Un grand nombre des passes de celles brutes, intermédiaires, pre-finisseries jusqu'au finisseries peuvent être complétés dans un seul projet. Une caractéristique de ce logiciel est le fait qu'il utilise une procédure claire pour contabiliser l'effet de la tension/compression sur la tension limite du matériel.

On peut utiliser la version web de ce logiciel en payant une taxe pour une utilisation annuelle de 300 \$ ou pour une utilisation semestrielle de 180 \$.

2. Mill Force/Torque Prediction Suite – est un ensemble des logiciels désigné de calculer la force et le couple de laminage.

La version web a un prix de 130 \$ pour une utilisation annuelle et 80 \$ pour une utilisation semestrielle.

3. FDM Temperature Profile-Rolling and Controlled Cooling – ce logiciel utilise la méthode des différences finies (FDM) pour déterminer le profil de la température de la tôle pendant le laminage. La température sur la surface de la tôle est déterminée et affichée pendant le laminage en partant du début du processus. Dans le cas du laminage on calcule la quantité de la chaleur généré et les coefficients du transfert de la chaleur.

Une version web de ce logiciel pour une utilisation pendant une année a un prix de 350 \$ et 210 \$ pour une utilisation semestrielle.

Ces logiciels conduisent à une efficacité économique croissante quantifié par la croissance de la qualité de la tôle et de la productivité.

CHAPITRE 8

La technique de la sécurité du travail et la fiabilité des laminoirs quarto réversibles

8.1 Normes de la technique de la sécurité du travail dans les installations électriques métallurgiques

1. Chaque membre du personnel d'un laminoir doit porter obligatoirement le vêtement, la casque et les gants de protection.
2. Pour éviter l'accidentation des personnes qui circulent dans la section de laminage, il est interdit de jeter les pièces en desordre ou de déposer des matériaux ou des rebuts dans la salle. Les cylindres de laminage sont déposés sur des grilles et des supports, en ayant entre eux des espaces pour la manipulation.
3. Les outillages qui ont en componse des pièces en mouvement doivent être protégés par des carcasses de protection correspondantes. Ces outillages ne se mettent pas en fonction avant de monter les dispositifs de protection, pour exclure la possibilité de blessure des laminateurs ou du personnel d'entretien.
4. Pour éviter la blessure des laminateurs, pendant les interventions dans le processus de laminage ou pour les réparations, il est interdit qu'ils travaillent avec des outils défectueux ou impropres pour le travail respectif.
5. Les manevrants qui commandent des moteurs d'actionnement des cylindres de laminage sont obligés de superviser en permanence l'évolution du processus de laminage et d'arrêter les moteurs immédiatement qu'ils constatent un danger de dégât ou d'accident.
6. Aussi, dans le cas de dégât il est interdit d'éloigner les dispositifs de protection montés sur les ensembles en mouvement et d'intervenir dans les installations avant d'arrêter le laminage et avant le découplage de l'actionnement électrique des outillages en cause.
7. Pendant le changement des cylindres de laminage on doit découpler tous les outillages afférents du train de laminage où se fait le travail. Le manevrant du poste de commande va demander à la salle de machines de déconnecter les actionnements, et après l'exécution il confirmera aux laminateurs qu'ils peuvent commencer le travail.
8. Les laminateurs et les manevrants n'ont pas le droit d'intervenir aux actionnements électriques ou mécaniques pendant le changement des cylindres de laminage, pour éviter les possibles accidents.
9. Le démarrage des moteurs d'actionnement électrique après le fin des opérations de montage et de réglage est permis seulement dans le cas lequel tous les marques de contrôle sont présentes sur le panneau du poste de commande.

8.2 La fiabilité

Dans une entreprise spécialisée dans la fabrication des tôles minces il est très important de maintenir le flux de production et en même temps de satisfaire les demandes requises par le client, pour réduire le pourcentage de marchandise refusée et pour déterminer les événements qui peuvent conduire à cette situation.

Ici s'impose une analyse qualitative qui permet de déterminer les faiblesses du système. Elle est faite dans le but de proposer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système.

La recherche des éléments les plus critiques est faite en déterminant les chemins qui conduisent à un événement. Ces chemins critiques représentent des scénarios qui sont analysés en fonction des différentes modifications qu'il est possible d'apporter au système. L'analyse des scénarios qui conduisent à un événement est faite à partir des arbres de défaillances, il est alors possible de disposer des barrières de sécurité pour éviter les incidents.

Aussi il est possible d'évaluer la probabilité d'apparition de l'événement en connaissant la probabilité des événements élémentaires. L'analyse quantitative permet de déterminer d'une manière quantitative les caractéristiques de fiabilité du système étudié. L'objectif est en particulier de définir la probabilité d'occurrence des divers événements analysés.

Il est nécessaire de vérifier que le système de laminage a un fonctionnement cohérent, de connaître la décomposition fonctionnelle du système, de définir les limites du système et de connaître la mission du système et son environnement pour déterminer les événements qu'il est nécessaire d'étudier, tout dans le but de définir les événements qu'on veut analyser en spécifiant ce qu'ils représentent et dans quel contexte ils peuvent apparaître.

CHAPITRE 9

CONCLUSIONS

1. Les systèmes de régulation numérique, avec l'information donnée par les appareils de mesure (capteurs, tahogenerateurs) et par des modèles mathématiques du processus utilisé, augmente la qualité des produits et contribuent à la diminution des rebuts de laminage, donc à la croissance de la productivité.

2. Les fabricants des produits laminés doivent, en tenant compte des demandes des clients, décider quel système de régulation doivent adopter. La capacité d'adaptation au demandes du marché est très importante; on peut produire des tôles de très bonne qualité si on utilise un système complexe avec bonnes performances, pour les clients exigeants, mais aussi des tôles d'une qualité moyenne et aussi faible pour les clients moins exigeants.

3. Ce projet propose l'amélioration du système d'automatisation par la présentation du logiciel LAMIN, qui conduit à l'optimisation des méthodes de régulation de l'épaisseur des tôles d'acier.

4. Le système proposé atteint l'objectif de restriction du champ des tolérances, respectivement la croissance des produits de qualité I A, qui signifie la croissance de la valeur de production et donc de l'efficacité économique.

5. Ces types d'automatisations déterminent la croissance des performances des laminoirs en contribuant au développement continu des produits plats et autres produits spécifiques au domaine de la métallurgie.

Bibliographie:

1. Emil Ceangă, Ludovic Protin si N. Cutululis – Théorie de la commande des systèmes, Editure Technique, 2001
2. Ion Bivol – Acționări electrice moderne
3. F. Feldmann, M. Gerdau, A. Follmer – Des Modèles Adaptatifs Pour Les Laminaires à Froid, Revue ABB, 2009
4. W. Lehnert, R. Kawalla: Deformation Inhomogeneity and Texture Development brought about in Steel Strip by Multi-Step cold rolling, Steel Research International 76, Stahleisen GmbH, 2005
5. M. Schlang, B. Feldkeller, B. Lang, T. Poppe – Neural Computation in steel industry, work funded and supported by Siemens Industrial Projects
6. I. Ovesea, A. Murariu, D. Gheorghiu, I. Suciuc – L'outillage et la technologie de laminage, Editure Didactique Et Pedagogique, Bucarest, 1977
7. www.mathworks.com – Documentation – Control System Toolbox
8. Matlab Toolbox & Help
9. www.cyber.uhp-nancy.fr/demos/MAIN-016/modelisation
10. www.metalpass.com – Development of Model-intensive Web-based Rolling Mill Applications

