

Sujet de thèse :

Amélioration environnementale de la chauffe de lopins par induction grâce à un pilotage adaptatif du procédé via un jumeau numérique

Mots-clés : impact environnemental, procédés de fabrication, modélisation, digitalisation.

1. Contexte :

Le Centre technique des industries mécaniques (CETIM) en lien avec les entreprises du secteur de la forge, notamment sur les questions d'efficacité énergétique, s'associe avec le Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC) d'Arts et Métiers Sciences et Technologies à Metz pour proposer une thèse visant au pilotage adaptatif de la chauffe de lopins par induction via un jumeau numérique.

De nos jours le changement climatique et l'empreinte carbone des produits manufacturés est un enjeu sociétal de premier plan. En l'occurrence, dans le cadre de la mise en forme à chaud, l'opération de chauffe du lopin à la température de forgeage contribue aux émissions de CO₂. Cette montée en température peut se faire historiquement grâce à plusieurs technologies mais l'électrification de la filière, avec l'électricité bas carbone en France, et les hauts rendements énergétiques poussent vers l'utilisation des technologies à induction électromagnétique au détriment des fours à gaz.

Cette technologie se base sur un profil de puissance type déterminé par des essais de mise au point car aujourd'hui la prédictivité de la simulation numérique multiphysique reste encore relative. Ce profil dépend de la géométrie de l'inducteur et du lopin, du matériau à chauffer et des limites de l'équipement. Usuellement, il est optimisé pour des conditions nominales et est exécuté en boucle ouverte. Ainsi aucune information ne permet d'ajuster les paramètres opératoires en fonction, par exemple, des conditions optimales de couplage électromagnétique entre le lopin et l'équipement qui évoluent pendant la chauffe. Il n'est donc pas possible d'ajuster les paramètres de chauffe en fonction de critères spécifiques au lopin traité ou à des critères environnementaux particuliers. Ainsi des modèles à faibles temps de calcul et enrichis par la donnée expérimentale permettraient d'obtenir la cartographie thermique de la pièce nécessaire et suffisante pour l'obtention de ses propriétés d'emplois (par exemples mécaniques) après forgeage en optimisant les paramètres énergétiques de l'équipement de chauffe.

2. Objectifs de la thèse

L'objectif de cette thèse est d'établir une méthodologie pour démontrer la maîtrise du procédé de chauffe par induction en fonction des spécifications du produit forgé et l'obtention de ses propriétés d'emplois. Pour répondre à cet objectif, les axes suivants seront explorés :

1. Obtention de la cartographie thermique de la pièce (en surface et à cœur) avant l'opération de mise en forme :
 - a. Modélisation et calcul de référence des champs thermiques en fonction des paramètres opératoires
 - b. Développement du modèle à faible temps de calcul et enrichi par la donnée

- c. Complément du modèle pour faire le lien entre champs thermiques et consommations énergétiques de différentes structures de chauffe
 - d. Validation du modèle et adaptation des paramètres opératoires au cours du procédé pour atteindre une cartographie donnée
2. Optimisation du processus de forgeage à chaud du produit
 - a. Définitions des critères d'optimisation techniques (notamment la cartographie cible pour garantir les propriétés d'emploi) et énergétiques/environnementaux pour un cas d'application donné
 - b. Etablir et valider le chemin thermomécanique du processus de forgeage à chaud en fonction des critères choisis

3. Programme de la thèse

1. Etat de l'art sur procédés de chauffe
 - o Vérifier les fenêtres-procédé industrielles de la chauffe
 - o Modèles hybrides, modèles IA symboliques, ...
2. Modélisation physique / Simulation de la chauffe d'un lopin (géométrie(s), matériau(x) métallique(s) à définir)
3. Ajout de la modélisation énergétique du dispositif de chauffe en fonction des paramètres choisis
4. Conception et Analyse d'essais instrumentés
5. Définition et identification du modèle de substitution à partir des données d'essai
6. Utilisation du modèle de substitution via un plan d'expérience depuis la fenêtre-procédé jusqu'à la caractérisation du produit (dureté, microstructure, essai mécanique, ...)

4. Profil recherché

Formation : Titulaire d'un Master 2 (idéalement master recherche) ou diplôme d'ingénieur

Compétences souhaitées :

- Expérience en modélisation numérique ou analytique
- Sensibilisation aux modèles d'IA
- Programmation en langage python
- Intérêt marqué pour l'expérimentation et la validation de modèles à partir de données réelles.

Compétences transversales :

- Capacités rédactionnelles (français et anglais courant).
- Rigueur scientifique, curiosité, et capacité à travailler en collaboration avec des partenaires industriels et académiques.
- Autonomie et aptitude à gérer un projet complexe sur plusieurs années.

Qualités personnelles :

- Capacité d'intégration, communication efficace et dynamisme.
- Sens de l'organisation et adaptabilité face aux défis techniques.

5. Modalités pratiques

Durée : 3 ans

Lieux :

- LCFC à Arts et Métiers Campus de Metz, (4 Rue Augustin Fresnel 57070 Metz)
- CETIM Senlis (52 Avenue Félix Louat, 60300 Senlis)

Début envisagé : au plus tard 01/01/2027

Contact : envoyer CV à jour, lettre de motivation, relevés de notes et documents jugés utiles à :

- Marc Borsenberger (LCFC) : marc.borsenberger@ensam.eu
- Cyrille Baudouin (LCFC) : cyrille.baudouin@ensam.eu
- Laurent Langlois (LCFC) : laurent.langlois@ensam.eu
- Eric Sénéchal (CETIM) : eric.senechal@cetim.fr