

PROJET DE THESE

Formation des microstructures et des microtextures lors de traitements thermiques avec chauffage par induction d'un acier à hautes performances

CONTEXTE

L'IRT M2P est un centre de recherches mutualisées créé en juin 2013, associant des industriels et des établissements de recherche et d'enseignement supérieur qui est positionné sur les technologies avancées d'élaborations, transformations et caractérisations des matériaux.

www.irt-m2p.fr/fr

L'Institut Jean Lamour (IJL) est une unité mixte de recherche (UMR 7198) du CNRS et de l'Université de Lorraine. Centré sur la science et le génie des matériaux et des procédés, il couvre les domaines des matériaux, de la métallurgie, des plasmas, des surfaces, des nanomatériaux et de l'électronique.

Il regroupe 183 chercheurs/enseignants, 91 ingénieurs/techniciens/personnel administratif, 150 doctorants et 25 post-doctorants. Des partenariats existent avec 150 entreprises et nos groupes de recherche collaborent avec plus de 30 pays à travers le monde. Ses plateformes instrumentales exceptionnelles sont réparties sur 4 sites dont le principal est situé sur le campus Artem à Nancy.

ijl.univ-lorraine.fr

Le Laboratoire d'Etude des Microstructure et de Mécanique des Matériaux (LEM3) est une unité Mixte de Recherche CNRS (UMR 7239) – Université de Lorraine – Arts et Métiers, regroupant 250 personnes, réparties sur 3 sites en Lorraine dont le site principal à Metz, campus Metz Technopôle. Son activité de recherche est organisée au sein de 3 départements scientifiques : (1) Mécanique des matériaux, des structures et du vivant, (2) Ingénierie des microstructures, procédés, anisotropie, comportement, (3) Thermomécanique des procédés et des interactions outil-matière. À cela s'ajoutent 3 plateformes technologiques offrant des équipements de pointe au service de nos activités de recherche.

lem3.univ-lorraine.fr

DESCRIPTION DU SUJET

La trempe de contour par induction permet de renforcer en surface des composants en acier (engrenages, transmission...) par un chauffage rapide près de la surface suivi d'une trempe. La résistance à l'usure et à la fatigue sont augmentées grâce à un durcissement en surface, au maintien de la ductilité à cœur, et à la formation de contraintes résiduelles de compression en surface. On cherche actuellement à appliquer la trempe de contour à de nouvelles nuances d'aciers plus riches en éléments d'alliages (Mo, V, Cr...) pour viser des applications à plus haute température. Ces éléments ont un impact significatif sur les évolutions microstructurales, qu'il faudra étudier car elles influencent la formation des contraintes résiduelles, les profils de microstructures et de microtextures, et le comportement mécanique.

La thèse portera sur les évolutions microstructurales et la formation des microtextures au cours du chauffage rapide et de la trempe. L'acier étudié aura une microstructure initiale composée de martensite revenue contenant des carbures alliés et de l'austénite résiduelle. Au chauffage, on étudiera les interactions entre les carbures en cours de dissolution, la transformation austénitique, la redistribution des éléments d'alliage au sein de la microstructure, et la croissance des grains d'austénite. A la fin du chauffage, ces phénomènes seront avancés en surface mais plus partiels en profondeur à cause du cycle thermique local (ex : [1]). Il faudra connaître la microstructure à cet instant et en chaque point du profil pour comprendre la formation des microstructures et des microtextures lors de la trempe.

Plusieurs questions seront abordées :

- Analyser l'impact sur les évolutions microstructurales des carbures alliés, qui différencient ces alliages par rapport à des aciers faiblement alliés plus conventionnels. On étudiera aussi l'influence de la microstructure initiale.

- Comprendre les mécanismes de transformations de phases lors d'un chauffage rapide (plus de 100°C/s, ex : [2]).
- Etudier les microtextures martensitiques à partir de cartographies EBSD réalisées après la trempe (reconstruction cristallographique des grains d'austénite [3], distributions des paquets / blocs / lattes).
- Sur le plan expérimental, contribuer au développement de méthodes in situ pour caractériser les évolutions microstructurales en cycle rapide (dilatométrie et DRX haute énergie synchrotron, ex : [4]), ou pour des cycles plus lents (EBSD in situ, microscopie confocale). Les microstructures seront aussi examinées post mortem à différentes échelles (EBSD, MEB/TKD, MET).
- L'analyse s'appuiera également sur la modélisation à base physique des processus métallurgiques.

On examinera également des traitements thermiques innovants de revenu après chauffage rapide et trempe.

L'étude expérimentale s'appuiera principalement sur des échantillons de dilatométrie homogènes en température, mais également sur quelques échantillons de laboratoire plus massifs pour étudier les profils de microstructure. Ces échantillons massifs seront traités thermiquement à l'aide de la plateforme de trempe de contour de l'IRT-M2P [5]. Sur ces derniers échantillons, des profils de contraintes résiduelles seront mesurés.

PROFIL ATTENDU :

Master 2 en Science des Matériaux

Le diplôme M2 ou une attestation sont nécessaires pour l'inscription à l'Ecole Doctorale C2MP.

<http://doctorat.univ-lorraine.fr/fr/les-ecoles-doctorales/c2mp/presentation>

CADRE DE L'ÉTUDE : La thèse aura pour cadre un projet Ressources Emergentes (RESEM) en collaboration l'IRT-M2P, l'IJL, le LEM3, Safran Transmission Systems, Safran Tech et le CETIM.

LIEU : Le/la doctorant/e sera employé/e par l'IRT-M2P, accueilli/e principalement à l'Institut Jean Lamour (Nancy), et une partie des travaux se fera au LEM3 et à l'IRT-M2P.

REMUNERATION : 36 660€ brut annuel (soit 3055€ brut mensuel)

DATE DE DEMARRAGE : Octobre 2025

CONTACT : envoyer CV et lettre de motivation, accompagnés de la copie des diplômes à :

- | | |
|-----------------------------|--|
| • Julien TEIXEIRA | julien.teixeira@univ-lorraine.fr |
| • Nathalie GEY | nathalie.gey@univ-lorraine.fr |
| • Pierre-Emmanuel ABA PEREA | pierre-emmanuel.aba-perea@irt-m2p.fr |

Références bibliographiques

- [1] S. Denis, D. Farias, A. Simon, Mathematical Model Coupling Phase Transformations and Temperature Evolutions in Steels, *ISIJ Int.* 32 (1992) 316–325. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.316>.
- [2] N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki, D. Ponge, D. Raabe, Transition from Diffusive to Displacive Austenite Reversion in Low-Alloy Steel, *ISIJ Int.* 53 (2013) 2275–2277. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.2275>.
- [3] L. Germain, N. Gey, R. Mercier, P. Blaineau, M. Humbert, An advanced approach to reconstructing parent orientation maps in the case of approximate orientation relations: Application to steels, *Acta Mater.* 60 (2012) 4551–4562. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.034>.
- [4] J. Teixeira, M. Moreno, S.Y.P. Allain, C. Oberbillig, G. Geandier, F. Bonnet, Inter-critical annealing of cold-rolled ferrite-pearlite steel: microstructure evolutions and phase transformation kinetics, *Acta Mater.* (2021) 116920. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116920>.
- [5] Zoom sur la plateforme de trempe de contour par induction | IRT M2P, (n.d.). <https://www.irt-m2p.fr/fr/articles/zoom-sur-la-plateforme-de-trempe-de-contour-par-induction> (accessed April 14, 2025).

PhD CONTRACT OFFER

Microstructures and microtextures formation during thermal treatments with induction heating of a high-performance steel

CONTEXT

IRT M2P is a joint research center set up in June 2013, bringing together industrial companies and research and higher education establishments to focus on advanced technologies for the development, transformation and characterization of materials.

www.irt-m2p.fr/fr

Institut Jean Lamour (IJL) is a joint research unit (UMR 7198) of the CNRS and the University of Lorraine. Focusing on the science and engineering of materials and processes, it covers the fields of materials, metallurgy, plasmas, surfaces, nanomaterials and electronics.

It brings together 183 researchers/teachers, 91 engineers/technicians/administrative staff, 150 doctoral students and 25 post-doctoral students. Partnerships exist with 150 companies and our research groups collaborate with more than 30 countries around the world. Its exceptional instrumental platforms are spread over 4 sites, the main one being located on the Artem campus in Nancy.

ijl.univ-lorraine.fr

The Laboratoire d'Etude des Microstructure et de Mécanique des Matériaux (LEM3) is a CNRS (UMR 7239) - Université de Lorraine - Arts et Métiers joint research unit, with 250 staff spread over 3 sites in Lorraine, including the main site in Metz, on the Metz Technopôle campus. Its research activities are organised into 3 scientific departments: (1) Mechanics of materials, structures and living organisms, (2) Engineering of microstructures, processes, anisotropy and behaviour, (3) Thermomechanics of processes and tool-matter interactions. In addition, there are 3 technology platforms offering cutting-edge equipment for our research activities.

LEM3 employs around 250 people, including 150 permanent staff (11 researchers, 105 teacher-researchers, 45 administrative and technical staff) and more than 80 doctoral and post-doctoral students.

lem3.univ-lorraine.fr

OBJECTIVES, MISSIONS, ACTIVITIES

Induction contour hardening allows to reinforce at the surface steel components (gears, transmission...) by applying fast heating near the surface followed by a quench. Resistance to wear and fatigue are increased thanks to hardening of the surface, while the ductility is kept at core, and to the formation of compressive residual stresses near the surface. Research and development activity is ongoing to apply contour hardening to new steel grades richer in alloying elements (Mo, V, Cr...), for applications at higher temperature. These elements have a significant impact on microstructural evolutions, which need to be studied because these evolutions influence the formation of residual stresses, the profiles of microstructures and microtextures, and the mechanical behavior.

The thesis will be focused on the microstructural evolutions and the formation of microtextures during the fast heating and the quench. The studied steel will have an initial microstructure composed of tempered martensite containing alloyed carbides, and of residual austenite. During heating, we will study the interactions between the carbides undergoing dissolution, the austenite transformation, the redistribution of alloying elements inside the microstructure and the austenite grains growth. At the end of heating, these phenomena will be well advanced near the surface, but more partial deeper, because of the local thermal cycle (ex : [1]). It will be necessary to know the microstructure at this instant and at each point of the profile in order to understand the formation of microstructures and microtextures during the quench.

Several questions will be addressed:

- Analyzing the impact on microstructural evolutions of the alloyed carbides, which set the new steel grades apart from more conventional low-alloy steels. The influence of the initial microstructure will also be studied.
- Understanding the phase transformation mechanisms upon fast heating (more than 100°C, e.g. [2]).
- Studying the microtextures of martensite on the basis of EBSD maps realized after the quench (crystallographic reconstruction of austenite grains [3], packets / blocks / laths distributions).
- On the experimental side, contribute to the development of in situ methods to characterize microstructural evolutions upon fast thermal cycle (dilatometry and high-energy XRD at synchrotron beamlines, ex: [4]) or slower thermal cycles (in situ EBSD, confocal laser scanning microscopy). The microstructures will also be examined at different scales (EBSD, SEM/TKD, TEM).
- The analysis will also be based on physics-based modeling of metallurgical processes.

Innovative heat treatments of tempering after fast heating and quench will also be studied.

The experimental study will be based mainly on dilatometry samples with homogeneous temperature, but also on some more massive laboratory samples, to study the profiles of microstructure. These massive samples will be heat treated using the induction contour hardening platform of IRT-M2P [5]. On these latter samples, residual stress profiles will also be determined.

PROFILE

Master 2 in Materials Science

M2 diploma or certificate are necessary for registration at doctoral school C2MP.

<http://doctorat.univ-lorraine.fr/en/doctoral-schools/c2mp/presentation>

FRAMEWORK OF THE STUDY: The thesis will take place inside an Emerging Resources project (RESEM) gathering IRT-M2P, IJL, LEM3, Safran Transmission Systems, Safran Tech and CETIM.

LOCALIZATION: PhD student will be hired by IRT-M2P, main localization will be at IJL (Nancy), and one part of the activity will take place at LEM3 and IRT-M2P.

WAGES: 36 660€ gross salary per year (3055€ gross salary per month)

START DATE: October 2025

CONTACT: send CV, cover letter and copy of diplomas to:

- | | |
|-----------------------------|--|
| • Julien TEIXEIRA | julien.teixeira@univ-lorraine.fr |
| • Nathalie GEY | nathalie.gey@univ-lorraine.fr |
| • Pierre-Emmanuel ABA PEREA | pierre-emmanuel.aba-perea@irt-m2p.fr |

References

- [1] S. Denis, D. Farias, A. Simon, *Mathematical Model Coupling Phase Transformations and Temperature Evolutions in Steels*, ISIJ Int. 32 (1992) 316–325. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.316>.
- [2] N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki, D. Ponge, D. Raabe, *Transition from Diffusive to Displacive Austenite Reversion in Low-Alloy Steel*, ISIJ Int. 53 (2013) 2275–2277. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.2275>.
- [3] L. Germain, N. Gey, R. Mercier, P. Blaineau, M. Humbert, *An advanced approach to reconstructing parent orientation maps in the case of approximate orientation relations: Application to steels*, Acta Mater. 60 (2012) 4551–4562. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.034>.
- [4] J. Teixeira, M. Moreno, S.Y.P. Allain, C. Oberbillig, G. Geandier, F. Bonnet, *Intercritical annealing of cold-rolled ferrite-pearlite steel: microstructure evolutions and phase transformation kinetics*, Acta Mater. (2021) 116920. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116920>.
- [5] *Zoom sur la plateforme de trempe de contour par induction | IRT M2P*, (n.d.). <https://www.irt-m2p.fr/fr/articles/zoom-sur-la-plateforme-de-trempe-de-contour-par-induction> (accessed April 14, 2025).