

Offre de thèse pour un CDD doctorant

Sujet : Evolutions des microstructures au cours du revenu d'aciers fortement alliés après cémentation et carbonitruration

(english version below, page 5)

Informations générales

Lieu de travail : Nancy

Type de contrat : Contrat doctoral

Durée du contrat : 36 mois

Date d'embauche prévue : Octobre 2026

Quotité de travail : Temps complet

Rémunération : 2300 € brut par mois

Niveau d'études souhaité : Master en Sciences et Ingénierie des Matériaux, Métallurgie

Expérience souhaitée : Indifférent

Missions / Activités

Dans le contexte des futurs développements de moteurs (horizon 2035) répondant aux problématiques d'allègement et de réduction d'émissions de CO₂, les besoins de performance des roulements ont augmenté par rapport aux règles de dimensionnement des aciers à roulement usuels. Les aciers cémentés (fortement alliés) sont utilisés pour des applications soumises à des vitesses et pression de contact élevées ainsi qu'à des températures atteignant les 250°C. C'est dans ce contexte qu'une nouvelle nuance inoxydable, de composition 0,10C 0,5Mn 0,2Si 12Cr 1,5Ni 2,2Mo 0,7V 8,2Co 0,04Nb a été développée par SKF sur la base de la nuance P675 [1] pour répondre à ces besoins.

Une version carbonitrurée est visée comme traitement thermochimique comme amélioration de performances par rapport à la version cémentée (initialement développée) et tout en restant industriellement avantageuse vis-à-vis de traitement complexes (type cémentation-trempe et nitruration) appliqués à d'autres alliages.

La thèse a pour cadre une collaboration de recherche entre SKF et l'Institut Jean Lamour (IJL), collaboration visant à améliorer la compréhension des transformations de phases lors des traitements thermiques de nouvelles nuances d'aciers optimisées pour la transmission de puissance mécanique et pour des applications à haute température.

Problématique

Les traitements d'enrichissement en carbone et/ou en azote suivi d'une trempe et d'un revenu ont été largement étudiés dans les aciers faiblement alliés [2-4]. Des alliages à forte teneur en éléments d'alliage sont également utilisés, mais les évolutions microstructurales au cours des séquences de traitements thermiques complexes de ces

alliages ont été peu étudiées. La présence d'éléments susceptibles de former des carbures et des nitrures modifie drastiquement les évolutions microstructurales, par rapport aux aciers faiblement alliés. L'amélioration et la maîtrise de ces traitements nécessitent une connaissance plus approfondie des transformations de phases successives. Après cémentation ou carbonituration dans le domaine austénitique et refroidissement, ces aciers subissent une nouvelle austénitisation, une trempe, un traitement cryogénique, puis plusieurs revenus à $\sim 500^{\circ}\text{C}$. Après trempe, la microstructure martensitique présente des carbures alliés et des nitrures (primaires issus de l'enrichissement) et une fraction élevée d'austénite résiduelle. Les traitements thermiques ultérieurs permettent de décomposer une grande partie de l'austénite ainsi que la précipitation de nouveaux carbures alliés et nitrures (secondaires), afin d'augmenter les propriétés mécaniques (limite d'élasticité, dureté...) et d'obtenir une microstructure stable sous chargement en service (résilience, fatigue...). Les évolutions microstructurales à chaque étape de la séquence de traitements restent à établir et à quantifier [5].

Objectifs et programme de la thèse

La thèse aura pour objectif principal d'étudier les évolutions microstructurales au cours du revenu à haute température (500°C) d'un acier à forte teneur en éléments d'alliage soumis au préalable à un traitement de cémentation ou de carbonituration. Les phénomènes principaux seront la précipitation de carbures et de nitrures, la décomposition de l'austénite résiduelle et l'évolution de la matrice martensitique (morphologie, redistribution des éléments d'alliage et restauration des dislocations. On étudiera :

- la microstructure initiale (après trempe), pour différentes concentrations en carbone (0,7-1,5% m) et/ou en azote (0-0,7% m). Sa connaissance approfondie est indispensable pour interpréter les évolutions microstructurales au cours du revenu. Cette microstructure sera complexe, et on examinera la nature des carbures et nitrures primaires formés pendant l'enrichissement, leur distribution, la concentration en carbone et en azote restant en solution solide dans la matrice, l'austénite résiduelle (fraction, morphologies, distribution) et la densité de dislocations. (Les dislocations sont des sites de germination potentiels pour la précipitation au cours du revenu). Des phénomènes d'autorevenu peuvent aussi se produire pendant la trempe.
- les séquences de précipitation de carbures alliés et de nitrures secondaires au cours d'un double revenu à 500°C , ainsi que la décomposition de l'austénite résiduelle et les phénomènes de restauration. On établira les interactions entre ces phénomènes : la précipitation de carbures et de nitrures appauvrit l'austénite en carbone et en azote, ce qui la déstabilise. La stabilité de l'austénite dépend aussi des contraintes internes à l'échelle des phases. L'influence de la température de revenu sera aussi analysée.
- l'effet de la forte teneur en cobalt de l'alliage (8% m), dont on examinera l'impact sur les séquences de précipitation et la stabilité de l'austénite.
- l'effet d'une trempe cryogénique avant revenus. Les traitements cryogéniques modifient la fraction de martensite, mais aussi la distribution du carbone et peut-être de l'azote à l'échelle atomique et la présence de défauts au sein de cette phase. On étudiera ces effets et leur impact sur les séquences de précipitation au cours du revenu [6].

En plus de méthodes conventionnelles (dilatométrie, microscopie électronique à balayage, Spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS), diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD), micro-dureté...), l'étude expérimentale reposera sur des expériences DRX Haute Energie (synchrotron) pour mesurer simultanément, in situ et en cours de traitements thermiques, les cinétiques de transformations de phases, l'évolution des paramètres de maille, liés aux compositions chimiques et aux contraintes internes et les cinétiques de restauration des dislocations [2-4]. On étudiera des échantillons à composition en carbone et en azote soit homogène (éprouvettes de dilatométrie), soit à gradients de concentration (représentatifs des pièces industrielles), la concentration locale en carbone et en azote déterminant la microstructure initiale et les cinétiques au cours du revenu. La microscopie en transmission (MET) sera utilisée pour quantifier les microstructures de précipitation secondaire (nature, chimie des précipités, tailles, morphologies, distribution...). L'analyse reposera également sur la modélisation thermocinétique des transformations de phases [7,8] qui sera calibrée sur les données microstructurales élaborées durant le projet. La prévision de la limite d'élasticité après revenu en fonction des paramètres microstructuraux (état de précipitation, densité de dislocations...) pourra aussi être envisagée. Cet outil servira à terme à l'optimisation des trajets thermiques pour des futures applications industrielles.

Références

- [1] Trivedi, Hitesh K., Otto, Frederick, McCoy, Bryan, Bhattacharya, Rabi S., and Piazza, Timothy, "Heat Treatment Process for Martensitic Stainless Steel Pyrowear 675 for Improved Corrosion Resistance," Bearing Steel Technologies: 10th Volume, Advances in Steel Technologies for Rolling Bearings, STP 1580, John M. Beswick, Ed., pp. 465–484, ASTM International, West Conshohocken, PA 2015, <http://10.1520/STP158020140061>
- [2] S.D. Catteau, H.P. Van Landeghem, J. Teixeira, J. Dulcy, M. Dehmas, S. Denis, A. Redjaimia, M. Courteaux, Carbon and nitrogen effects on microstructure and kinetics associated with bainitic transformation in a low-alloyed steel, *J. Alloys Compd.* 658 (2016) 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.007>
- [3] J. Teixeira, K. Jeyabalan, G. Geandier, J. Dulcy, B. Denand, M.-R. Chini, S.D. Catteau, M. Courteaux, S. Denis, In situ HEXRD experimental study and prediction of microstructures and internal stresses during heat treatment of carburized and carbonitrided low-alloyed steels, *Acta Mater.* 275 (2024) 120065. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120065>
- [4] M. Costa Salazar, PhD thesis, The role of nitrogen on the mechanisms of phase transformation and microstructural evolution during the tempering of low-alloyed steel martensites, Université de Lorraine, France, 2025
- [5] J. Lian, L. Zheng, F. Wang, H. Zhang, Evolution of carbides on surface of carburized M50NiL bearing steel, *J. Iron Steel Res. Int.* 25 (2018) 1198–1211. <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0166-4>
- [6] V.G. Gavriljuk, V.A. Sirosh, Yu.N. Petrov, A.I. Tyshchenko, W. Theisen, A. Kortmann, Carbide Precipitation During Tempering of a Tool Steel Subjected to Deep Cryogenic Treatment, *Metall. Mater. Trans. A* 45 (2014) 2453–2465. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2202-8>
- [7] S. Gaudiez, PhD Thesis, Kinetics and microstructural evolutions during the tempering of martensitic and nano-bainitic low alloyed steels : in situ experimental study and modelling, Université de Lorraine, France, 2021. https://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2021_0016_GAUDEZ.pdf
- [8] J. Macchi, J. Teixeira, F. Danoix, G. Geandier, S. Denis, F. Bonnet, S.Y.P. Allain, Impact of carbon segregation on transition carbides and cementite precipitation during tempering of low carbon steels: Experiments and modeling, *Acta Mater.* 272 (2024) 119919. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119919>

Contexte de travail

La thèse se déroulera principalement à l'Institut Jean Lamour à Nancy, sous la direction de Julien Teixeira, Sébastien Allain et Sabine Denis. Elle sera en étroite interaction avec SKF. À l'issue de la thèse, l'étudiant ou l'étudiante aura appris à maîtriser la panoplie des dernières techniques de pointe dans le domaine de la caractérisation des transformations de phases : microscopie électronique à balayage, EBSD, microscopie électronique en transmission, dilatométrie, ainsi que la diffraction des rayons X sur ligne de lumière synchrotron. Un bagage précieux pour sa future carrière dans la recherche industrielle ou académique. Le ou la candidate devra avoir un gout prononcé pour l'expérimentation et le développement instrumental.

Compétences

- Titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou d'un Master 2 dans le domaine de la science et de l'ingénierie des matériaux, métallurgie.
- Connaissances en transformations de phases et des méthodes de caractérisation des matériaux.

A propos de l'Institut Jean Lamour

L'Institut Jean Lamour (IJL) est une unité mixte de recherche du CNRS et de l'Université de Lorraine. Spécialisé en science et ingénierie des matériaux et des procédés, il couvre les champs suivants : matériaux, métallurgie, plasmas, surfaces, nanomatériaux, électronique.

En 2026, l'IJL compte 243 permanents (34 chercheurs, 131 enseignants-chercheurs, 78 IT-BIATSS) et 389 nonpermanents (146 doctorants, 43 post-doctorants / chercheurs contractuels et plus de 200 stagiaires), de plus de 50 nationalités différentes. Il collabore avec plus de 150 partenaires industriels et ses collaborations académiques se déploient dans une trentaine de pays.

Son parc instrumental exceptionnel est réparti sur 4 sites dont le principal est situé sur le campus ARTEM à Nancy.

Contraintes et risques

Poste situé dans un secteur relevant de la protection du potentiel scientifique et technique et nécessitant, conformément à la réglementation, une autorisation par l'autorité compétente du MESR.

Modalités de candidature

Adresser CV, lettre de motivation accompagnée des noms de 2 références et relevés de notes (M1 et M2) à :

- **Julien Teixeira**, julien.teixeira@univ-lorraine.fr
- **Sébastien Allain**, sebastien.allain@univ-lorraine.fr
- **Sabine Denis**, sabine.denis@univ-lorraine.fr

PhD Position – Fixed-Term Doctoral Contract

Title: Microstructural Evolution During Tempering of Highly Alloyed Steels After Carburizing and Carbonitriding

General information

Work location: Nancy

Contract type: Doctoral contract

Duration: 36 months

Expected start date: October 2026

Workload: Full-time

Gross month salary: 2300 € / gross month

Required education level: Master in Materials Science and Engineering, Metallurgy

Experience required: Not applicable

Context and objectives

In the context of future engine developments (2035 horizon) addressing lightweighting and CO₂ emission reduction, the performance requirements for bearings have increased beyond the design rules of conventional bearing steels. Highly alloyed carburized steels are used in applications subject to high speeds, contact pressures, and temperatures up to 250°C. In this context, SKF has developed a new stainless steel grade, with composition 0.10C 0.5Mn 0.2Si 12Cr 1.5Ni 2.2Mo 0.7V 8.2Co 0.04Nb, based on the P675 grade [1], to meet these demands.

A carbonitrided version is targeted as a thermochemical treatment to improve performance compared to the initially developed carburized version, while remaining industrially advantageous compared to complex treatments (e.g., carburizing-quenching and nitriding) for other alloys.

This PhD is part of a research collaboration between SKF and the Institut Jean Lamour (IJL), aiming to improve the understanding of phase transformations during heat treatments of new steel grades optimized for mechanical power transmission and high-temperature applications.

Scientific problem

Carburizing and/or nitriding treatments followed by quenching and tempering have been widely studied in low-alloy steels [2–4]. High-alloy steels are also used, but the microstructural evolutions during complex heat treatment sequences of these alloys have been poorly studied. The presence of elements capable of forming carbides and nitrides drastically alters microstructural evolution compared to low-alloy steels. Improving and mastering these treatments requires a deeper understanding of successive phase transformations.

After carburizing or carbonitriding in the austenitic range and cooling, these steels undergo re-austenitization, quenching, cryogenic treatment, and several tempering steps at ~500°C. After quenching, the martensitic microstructure contains alloyed carbides and nitrides (primary, from enrichment) and a high fraction of retained austenite. Subsequent heat treatments decompose much of the austenite and promote the precipitation of new alloyed carbides and nitrides (secondary), to enhance mechanical properties (yield strength, hardness, etc.) and

achieve a stable microstructure under service loading (toughness, fatigue, etc.). The microstructural evolutions at each stage of the treatment sequence remain to be established and quantified [5].

PhD goals and program

The main objective of the PhD is to study the microstructural evolutions during high-temperature tempering (500°C) of a highly alloyed steel previously subjected to carburizing or carbonitriding. The key phenomena include precipitation of carbides and nitrides, decomposition of retained austenite, evolution of the martensitic matrix (morphology, redistribution of alloying elements, and dislocation recovery). The following aspects will be investigated:

- Initial microstructure (after quenching), for different carbon (0.7–1.5 wt.%) and/or nitrogen (0–0.7 wt.%) concentrations. A thorough understanding of this microstructure is essential to interpret microstructural evolutions during tempering. This microstructure will be complex, and the study will examine the nature, distribution, and chemistry of primary carbides and nitrides formed during enrichment, the carbon and nitrogen content remaining in solid solution in the matrix, retained austenite (fraction, morphologies, distribution), dislocation density (potential nucleation sites for precipitation during tempering). Autotempering phenomena may also occur during quenching.
- Precipitation sequences of alloyed carbides and secondary nitrides during double tempering at 500°C, as well as the decomposition of retained austenite and recovery phenomena. The interactions between these phenomena will be established: carbide and nitride precipitation depletes austenite of carbon and nitrogen, destabilizing it. The stability of austenite also depends on internal stresses at the phase scale. The influence of tempering temperature will also be analyzed.
- Effect of the high cobalt content (8 wt.%) in the alloy, examining its impact on precipitation sequences and austenite stability.
- Effect of cryogenic quenching before tempering: cryogenic treatments modify the martensite fraction, as well as the distribution of carbon and possibly nitrogen at the atomic scale, and the presence of defects within this phase. These effects and their impact on precipitation sequences during tempering will be studied [6].

In addition to conventional methods (dilatometry, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), electron backscatter diffraction (EBSD), micro-hardness, etc.), the experimental study will rely on High-Energy X-Ray Diffraction (synchrotron) to simultaneously measure, in situ and during heat treatments: phase transformation kinetics, evolution of lattice parameters (linked to chemical compositions and internal stresses), dislocation recovery kinetics [2–4]. Samples with either homogeneous carbon and nitrogen compositions (dilatometry specimens) or concentration gradients (representative of industrial parts) will be studied, as the local carbon and nitrogen concentration determines the initial microstructure and kinetics during tempering. Transmission Electron Microscopy (TEM) will be used to quantify secondary precipitation microstructures (nature, chemistry, size, morphology, distribution, etc.). The analysis will also rely on thermokinetic modeling of phase transformations [7, 8], which will be calibrated using the microstructural data developed during the project. Predicting the yield strength after tempering as a function of microstructural parameters (precipitation state, dislocation density, etc.) may also be considered. This tool will ultimately be used to optimize thermal paths for future industrial applications.

References

- [1] Trivedi, Hitesh K., Otto, Frederick, McCoy, Bryan, Bhattacharya, Rabi S., and Piazza, Timothy, “Heat Treatment Process for Martensitic Stainless Steel Pyrowear 675 for Improved Corrosion Resistance,” Bearing Steel Technologies: 10th Volume, Advances in Steel Technologies for Rolling Bearings, STP 1580, John M. Beswick, Ed., pp. 465–484, ASTM International, West Conshohocken, PA 2015, <http://10.1520/STP158020140061>
- [2] S.D. Catteau, H.P. Van Landeghem, J. Teixeira, J. Dulcy, M. Dehmas, S. Denis, A. Redjaimia, M. Courteaux, Carbon and nitrogen effects on microstructure and kinetics associated with bainitic transformation in a low-alloyed steel, J. Alloys Compd. 658 (2016) 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.007>
- [3] J. Teixeira, K. Jeyabalan, G. Geandier, J. Dulcy, B. Denand, M.-R. Chini, S.D. Catteau, M. Courteaux, S. Denis, In situ HEXRD experimental study and prediction of microstructures and internal stresses during heat treatment of carburized and carbonitrided low-alloyed steels, Acta Mater. 275 (2024) 120065. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120065>

- [4] M. Costa Salazar, PhD thesis, The role of nitrogen on the mechanisms of phase transformation and microstructural evolution during the tempering of low-alloyed steel martensites, Université de Lorraine, France, 2025
- [5] J. Lian, L. Zheng, F. Wang, H. Zhang, Evolution of carbides on surface of carburized M50NiL bearing steel, J. Iron Steel Res. Int. 25 (2018) 1198–1211. <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0166-4>
- [6] V.G. Gavriljuk, V.A. Sirosh, Yu.N. Petrov, A.I. Tyshchenko, W. Theisen, A. Kortmann, Carbide Precipitation During Tempering of a Tool Steel Subjected to Deep Cryogenic Treatment, Metall. Mater. Trans. A 45 (2014) 2453–2465. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2202-8>
- [7] S. Gaudez, PhD Thesis, Kinetics and microstructural evolutions during the tempering of martensitic and nano-bainitic low alloyed steels : in situ experimental study and modelling, Université de Lorraine, France, 2021. https://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2021_0016_GAUDEZ.pdf
- [8] J. Macchi, J. Teixeira, F. Danoix, G. Geandier, S. Denis, F. Bonnet, S.Y.P. Allain, Impact of carbon segregation on transition carbides and cementite precipitation during tempering of low carbon steels: Experiments and modeling, Acta Mater. 272 (2024) 119919. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119919>

Work environment

The PhD will primarily take place at the Institut Jean Lamour (IJL) in Nancy, under the supervision of Julien Teixeira, Sébastien Allain, and Sabine Denis. There will be close interaction with SKF. By the end of the PhD, the candidate will have mastered cutting-edge techniques in the field of phase transformation characterization, including Scanning electron microscopy (SEM), Electron backscatter diffraction (EBSD), Transmission electron microscopy (TEM), Dilatometry, Synchrotron X-ray diffraction. This expertise will be invaluable for a future career in industrial or academic research. The candidate should have a strong interest in experimentation and instrumental development.

Required skills

- Holder of an engineering degree or a Master's degree in Materials Science and Engineering, Metallurgy.
- Knowledge of phase transformations and materials characterization methods.

About the Institut Jean Lamour

The Institute Jean Lamour (IJL) is a joint research unit of CNRS and Université de Lorraine. Focused on materials and processes science and engineering, it covers: materials, metallurgy, plasmas, surfaces, nanomaterials and electronics. By 2026, IJL has 243 permanent staff (34 researchers, 131 teacher-researchers, 78 IT-BIATSS) and 389 non-permanent staff (146 doctoral students, 43 post-doctoral students / contractual researchers and more than 200 trainees), from some seventy different nationalities. Partnerships exist with 150 companies and our research groups collaborate with more than 30 countries throughout the world.

Its exceptional instrumental platforms are spread over 4 sites ; the main one is located on Artem campus in Nancy.

Constraints and risks

This position is located in a sector subject to the Protection of Scientific and Technical Potential (PPST), and in accordance with regulations, requires authorization from the competent MESR (Ministry of Higher Education and Research) authority.

Application procedure

Send CV, cover letter, names and contact details of 2 references, academic transcripts (M1 and M2) to:

- **Julien Teixeira**, julien.teixeira@univ-lorraine.fr
- **Sébastien Allain**, sebastien.allain@univ-lorraine.fr
- **Sabine Denis**, sabine.denis@univ-lorraine.fr