

Sujet de Thèse

Labo Commun Opale

Contexte et objectifs du projet

Modèles et simulations des mécanismes de dissolution/reprécipitation et mûrissement accéléré aux joints de grains et front de recristallisation sur nuances aéronautiques

Le laboratoire commun OPALE a été créé en 2019 entre Safran, le CNRS et Mines Paris PSL et étendu en 2026 à Aubert & Duval. Il associe l'expertise de deux centres de recherche (le CEMEF, centre de recherche de MINES Paris PSL, situé à Sophia Antipolis, et l'Institut Pprime, UPR du CNRS, situé à Poitiers). La laboratoire commun OPALE a pour vocation d'accompagner les groupes Safran et Aubert & Duval dans le développement des gammes de fabrication et l'optimisation du comportement en service de pièces de turbo-moteurs en superalliages base nickel. Motivé par des objectifs écologiques de plus en plus ambitieux, le programme de travail se concentre principalement sur les disques de turbines, dont la tenue limite la température de fonctionnement et donc le rendement des moteurs. Dans le cadre du laboratoire commun OPALE, plusieurs thèses sur des sujets complémentaires et connexes se déroulent en parallèle et font l'objet de réunions de suivi communes auxquelles participent activement les ingénieurs du groupe Safran. Le laboratoire commun OPALE offre ainsi un environnement de travail particulièrement riche et stimulant.

Travaux de thèse

La fabrication des disques de turbine en superalliages passe par différentes opérations de déformation à chaud et de traitement thermique au cours desquelles la microstructure évolue. Ces évolutions conditionnent la microstructure finale du matériau, donc la capacité du matériau à soutenir les conditions de température et de contrainte sévères vues en service, et la durée de vie de la pièce. Par ailleurs, afin de repousser encore les températures limites des superalliages employés et leurs performances mécaniques, des nuances de plus en plus alliées sont évaluées [1].

La complexité croissante de ces alliages appelle, par ricochet, à une remise en question des modèles et des simulations généralement pratiquées dans l'état de l'art pour discuter de l'évolution des joints de grains lors des mécanismes de recristallisation et de croissance de grains en présence de populations complexes de particules de seconde phase, particulièrement pour les superalliages de type $\gamma-\gamma'$ [2].

Les partenaires ont développé une large expérience des simulations appliquées aux superalliages base nickel [3-5] et concernant les mécanismes énoncés [6-8] et cette thèse aura pour but d'intégrer, aux outils de simulations, de nouveaux mécanismes d'interactions entre les précipités et les joints de grains lors de leur migration. En effet, au delà des mécanismes d'ancrage déjà bien documentés pour des populations statiques de précipité, l'évolution des particules de seconde phase en interaction avec les joints de grains peut mener à des mécanismes plus complexes à appréhender en termes d'impact sur la microstructure obtenue. Il s'agira de s'intéresser, au contact des joints de grains, à la dissolution/ reprécipitation et le mûrissement de ces précipités tout en mesurant précisément l'impact de ces mécanismes sur l'épinglage.

Enfin, les améliorations développées seront employées pour tester des hypothèses formulées sur base d'observations expérimentales pré-existantes quant à l'influence des caractéristiques topologiques des particules présentes et de leur évolution (taille, quantité, distribution spatiale, cohérence, éventuelle dissolution et/ou mûrissement). Si besoin, des données expérimentales supplémentaires pourront aussi être produites durant la thèse. Ce travail sera mené en étroite coopération avec l'ensemble des acteurs du projet, académiques et industriels. Ils pourront aussi être considérés pour intégration dans les logiciels développés par les partenaires.

Mines Paris PSL
 CEMEF rue Claude Daunesse CS 10207 06904
 Sophia Antipolis, France
 marc.bernacki@minesparis.psl.eu,
 madeleine.bignon@minesparis.psl.eu
 +33 (0)4 93 67 89 45

Mots-clés

Métallurgie - Simulation - Microstructure - Précipitation - Mûrissement - Joint de grains - Superalliages - Aéronautique.

Profil – Compétences recherchées

Master 2 ou diplôme d'ingénieur en Mathématiques Appliqués ou Métallurgie avec un très bon dossier. Compétences en modélisation numérique, compétences en anglais, capacités à travailler dans une équipe multidisciplinaire et cosmopolite.

Détails du poste

La thèse se déroulera au CEMEF, un laboratoire de renommée internationale de Mines Paris PSL. Le centre rassemble environ 170 personnes, dont 75 doctorantes et doctorants. Le/la doctorant(e) rejoindra le groupe de recherche Métallurgie, μ Structure et Rhéologie (MSR) sous la direction de Marc Bernacki et Madeleine Bignon. La rémunération se porte à environ 29k€ brut par an (impôts sur le revenu non déduits) avec avantages (mutuelle et tickets restaurants).

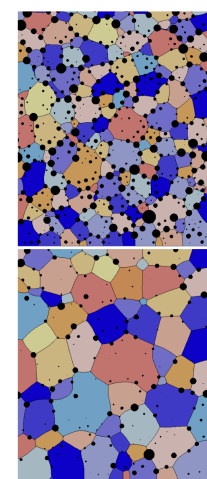


Fig. 2D grain growth simulation with evolutive second phase particles [4].

[1] P. Héritier. *Superalliages, Techniques de l'Ingénieur*, 2022.
 [2] T. Grosdidier et al. *Materials science & engineering. A*. 256 (1-2). 1998
 [3] A. Agnoli et al. *Computational Materials Science*, 89:233-241, 2014.
 [4] K. Alvarado et al. *Metals*, 11(12), 2021.
 [5] S. Florez, and M. Bernacki. *Computational Materials Science*, 256:113958, 2025.
 [6] A. Coyne-Grell. *PhD, Strathclyde Glasgow*, 2023.
 [7] S. Vernier. *PhD, Mines Paris PSL*, 2019.
 [8] F. Pascual Goce et al. *Materials science & engineering A*. 2026