

Sujet de Thèse

Chaire TOPAZE

Contexte

Microstructure des superalliages à base nickel : Analyse expérimentale et simulation numérique 3D

La chaire industrielle TOPAZE, co-financée par l'ANR et le groupe SAFRAN, porte sur la maîtrise des microstructures et propriétés mécaniques des superalliages à base nickel employés dans les moteurs d'avion et d'hélicoptère de nouvelle génération. Ces matériaux sont employés pour la fabrication de pièces de turboréacteurs en raison de leur tenue mécanique à haute température. L'amélioration des performances de ces alliages permettra d'élever la température de fonctionnement des moteurs et d'en améliorer le rendement, contribuant ainsi à la réduction du coût énergétique et de l'impact écologique du transport aérien.

La chaire TOPAZE fait suite à la chaire industrielle ANR-Safran OPALE (2015-2019). Elle réunit les compétences du CEMEF (MINES ParisTech, UMR CNRS 7635) concernant l'évolution des microstructures au cours des opérations de mise en forme et celles de l'Institut P' (ISAE-ENSMA, UPR CNRS 3346) concernant l'impact de la microstructure sur les propriétés mécaniques en service et la durabilité. Le programme de travail TOPAZE comprend 8 thèses sur la période 2020-2024, avec des sujets à dominante expérimentale, numérique ou mixtes, et couvrant de multiples domaines : Science des matériaux, Métallurgie physique, Mécanique des matériaux, Analyse microstructurale avancée, Simulation numérique. La chaire TOPAZE offre un environnement de travail particulièrement riche, en interaction avec de multiples experts académiques et industriels.

Pour en savoir plus sur les chaires industrielles ANR-Safran OPALE et TOPAZE :

<https://chaire-opale.cemef.mines-paristech.fr>

<https://chaire-topaze.cemef.mines-paristech.fr>

Sujet de thèse

La caractérisation tridimensionnelle (3D) de la microstructure des superalliages à base nickel est essentielle à l'analyse et à la modélisation des mécanismes métallurgiques à l'œuvre lors de la mise en forme de l'alliage ou au cours de la vie en service. Les superalliages étudiés ici sont des nuances polycristallines employées dans les parties les plus chaudes des moteurs d'avion de nouvelle génération. Les méthodes de mesure, d'analyse et de reconstruction de microstructures représentatives 3D sont encore récentes et nécessitent des développements spécifiques.

L'objectif premier de cette thèse est de fournir une description détaillée de la microstructure de superalliages polycristallins, dans différents états métallurgiques (recristallisé équiaxe, partiellement recristallisé, ou issu de fabrication additive).

Cette description concerne les grains constituant le polycristal, dont la taille varie de quelques microns à quelques centaines de microns, leurs défauts (mâcles, dislocations), ainsi que les précipités de seconde phase.

Les précipités de seconde phase sont essentiels dans ces superalliages, pour limiter la croissance de grains lors de la mise en forme (par ancrage des joints de grains par les précipités les plus gros, quelques microns de taille) ou pour assurer la tenue mécanique par durcissement structural (assuré par des précipités plus fins, de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres). Ces microstructures seront caractérisées expérimentalement puis reconstruites numériquement. Ce travail s'appuiera sur les moyens expérimentaux de microscopie 3D acquis récemment au CEMEF ainsi que sur les codes de genèse de microstructures et de simulation numérique développés au CEMEF dans le cadre de la chaire ANR DIGIMU.

Les microstructures numériques feront ensuite l'objet de simulations au moyen des outils DIGIMU, avec différents objectifs :

- Dans la microstructure équiaxe, la plus simple des trois étudiées, l'effet de la distribution spatiale des précipités sur la taille de grains limite atteinte après le traitement de mise en solution sera évalué. Cette microstructure sera également ré-exploitée dans une autre thèse de la chaire TOPAZE (à l'institut P'), pour des calculs de plasticité cristalline visant à simuler le comportement en service.
- La microstructure issue de fabrication additive est très anisotrope, écrouie et hors équilibre, avec de gros grains allongés dans la direction de lasage, de forme complexe. Les simulations seront conduites afin de déterminer si la croissance de grains pilotée par les énergies interfaciales est capable de rendre compte des évolutions observées expérimentalement au cours de traitements thermiques, ou si la germination de grains recristallisés est nécessaire.
- La microstructure partiellement recristallisée sera exploitée en partage avec un(e) autre doctorant(e) de la chaire TOPAZE, dont l'objectif est de simuler la formation des macles thermiques lors de la recristallisation de l'alliage.

Pour en savoir plus sur les outils DIGIMU :

<https://chaire-digimu.cemef.mines-paristech.fr>

Profil – compétences recherchées

- Formation d'ingénieur ou master en métallurgie / science des matériaux / génie des matériaux / mécanique des matériaux
- Goût pour la recherche, pour les techniques d'analyse de pointe et pour la modélisation,
- Programmation informatique, traitement et analyse d'images numériques 3D
- Rigueur et capacité à s'investir pleinement dans un sujet ; Aptitude au travail en équipe
- La maîtrise de la langue anglaise est indispensable

Equipe d'accueil et lieu

La thèse se déroulera au CEMEF (MINES ParisTech, Sophia Antipolis, 06). L'encadrement sera assuré par Pr. Marc Bernacki, Pr. N. Bozzolo et Dr. A. Nicolaÿ, avec le concours de Dr. L. Signor de l'institut P'.

Financement

Chaire ANR-Safran TOPAZE

Mots-clés

Microstructure polycristalline ; Microscopie 3D ; Simulation numérique ; Développement méthodologique ; Traitement et analyse d'images ; Superalliages ; Aéronautique

Dossier de candidature

Pièces à envoyer à marc.bernacki@mines-paristech.fr, nathalie.bozzolo@mines-paristech.fr, alexis.nicolay@mines-paristech.fr:

- CV détaillé
- Relevés de notes des trois dernières années et classement dans la promotion
- Lettre de motivation
- Deux lettres de recommandation

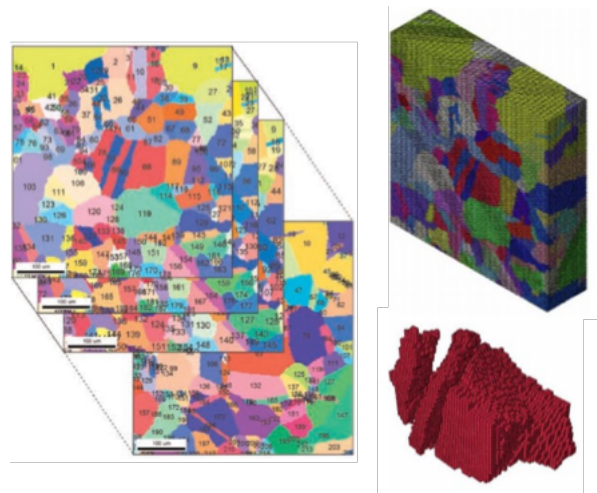


Illustration d'une reconstruction EBSD 3D.