

Sujet de Thèse

Chaire TOPAZE

Contexte

Formation des macles dans les microstructures de superalliages base nickel : mécanismes et simulation numérique.

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

Les superalliages base nickel polycristallins sont utilisés pour la fabrication des disques des parties les plus chaudes des moteurs d'avion car ils permettent de résister aux conditions en service extrêmement sévères, de fortes contraintes à haute température. Leur microstructure doit être optimisée pour garantir la tenue mécanique et la durabilité des pièces. La présence de macles est caractéristique de ces microstructures et peut jouer un rôle néfaste sur certaines propriétés, notamment en fatigue. A l'inverse, les joints de macles peuvent être bénéfiques, du point de vue de la résistance à l'oxydation par exemple. Contrôler ces défauts apparaît donc comme un levier possible pour l'optimisation des propriétés. Bien que les macles constituent un défaut cristallin bien connu, les mécanismes responsables de leur formation n'ont pas été formellement identifiés.

Des travaux antérieurs menés dans l'équipe d'accueil ont montré que les macles se forment essentiellement durant la recristallisation, avec des morphologies complexes. Elles évoluent ensuite pour adopter une configuration plane plus classique. Une nouvelle hypothèse a été formulée à l'issue de ces travaux concernant les conditions favorables à la formation de macles, cette hypothèse repose sur un critère topologique qui reste à vérifier expérimentalement et à conforter par simulation numérique. Il a par ailleurs été suggéré récemment que la présence de précipités pourrait favoriser la formation de macles, par un mécanisme non totalement élucidé. Cette thèse a pour objectif principal de valider ou invalider les hypothèses émises jusque-là, et éventuellement de proposer des explications alternatives.

Des microstructures partiellement recristallisées seront caractérisées en 3D au moyen d'un microscope récemment acquis au Cemef et de méthodes de reconstruction mises au point dans une autre thèse de la chaire TOPAZE. Les sites de germination des macles seront analysés en détail afin d'affiner le critère de germination à implémenter dans les modèles de recristallisation. Des simulations numériques seront ensuite conduites au moyen des outils numériques DIGIMU. Les microstructures γ sont représentées explicitement par un maillage « éléments finis » et évoluent selon les lois physiques régissant la migration des interfaces (joints de grains) par des approches de type front-capturing ou front-tracking. Des développements ont récemment été réalisés dans ces outils pour être capable de gérer la forte différence d'énergie interfaciale qui existe entre les joints de macles et les joints de grains généraux (Thèse soutenue en janvier 2020 dans le cadre de la chaire OPALE).

La formation de macles au cours de la recristallisation pourra ainsi être simulée et les topologies de macles obtenues seront confrontées aux topologies réelles, mesurées expérimentalement en 3D. Le second objectif de cette thèse est de produire des microstructures numériques contenant des quantités et topologies de macles réalistes, qui pourront faire l'objet de calculs de plasticité pour évaluer l'impact des macles sur la tenue mécanique. La thèse vise ainsi à la compréhension de mécanismes fondamentaux, étudiés ici dans les superalliages base nickel mais transposables à de nombreux autres types d'alliages sujets au maillage thermique. Ce travail s'appuiera sur des outils expérimentaux et numériques à la pointe de l'état de l'art. La balance entre les parties expérimentales et numériques pourra être ajustée en fonction du profil du candidat retenu.

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 la simulation numérique,
- 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 et Pr. N. Bozzolo.

Financement

Chaire ANR-Safran TOPAZE

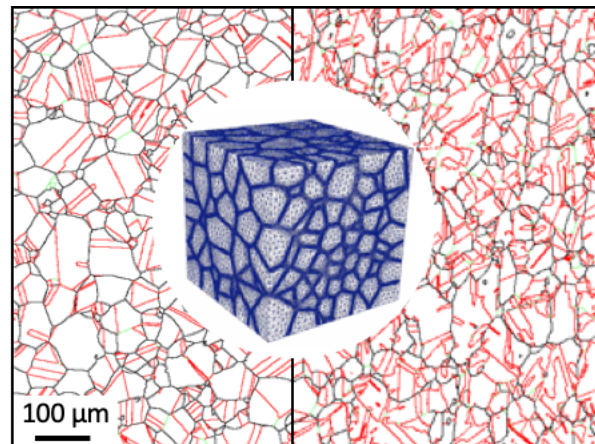
Mots-clés

Aéronautique ; Superalliages base nickel ; Recristallisation ; Macles ; Modélisation ; Simulation numérique

Dossier de candidature

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

- CV détaillé,
- relevés de notes des trois dernières années, et classement dans la promotion,
- lettre de motivation,
- deux lettres de recommandation.



Microstructures d'un superalliage base nickel avec joints de grains en noir et joints de macles en rouge, issue de croissance de grains à gauche, de recristallisation à droite. Encart : microstructure polycristalline 3D immergée dans un maillage éléments finis.