

Thèse de Marie-Agathe CHARPAGNE

CIFRE Safran Aircraft Engines, CEMEF MINES ParisTech



Evolutions de microstructure au cours du forgeage de l'alliage René 65

Les alliages à base Nickel polycristallins sont largement utilisés pour les pièces aéronautiques soumises à des sollicitations extrêmes en service (fatigue, fluage à haute température et en milieu corrosif et sous de hauts niveaux de contrainte). Des objectifs toujours plus ambitieux en termes de rendement énergétique des moteurs d'avions ont conduit les constructeurs à augmenter leur température de fonctionnement. Les nuances utilisées jusqu'alors dans les parties chaudes, tels que l'Inconel 718, n'ont pas une tenue mécanique suffisante à ces températures. Le René 65 est un nouvel alliage à microstructure γ - γ' élaboré spécifiquement par *General Electric* pour ces applications. Il a été retenu par *Safran Aircraft Engines* comme constituant des disques de turbine basse pression pour le nouveau turboréacteur LEAP. Pour garantir la bonne tenue mécanique des disques, une microstructure fine et homogène est requise. Le procédé de forgeage de ces pièces est une séquence complexe alternant des étapes de déformation à chaud et de traitements thermiques, durant lesquelles la microstructure évolue. Si les phénomènes physiques gouvernant les évolutions microstructurales sont connus, leurs mécanismes exacts et leurs cinétiques varient d'un alliage à l'autre. L'enjeu de ce travail est de déterminer le comportement microstructural de l'alliage René 65 lors d'opérations de forgeage à chaud en fonction des conditions thermomécaniques appliquées.

Pour ce faire, des essais de déformation à chaud ont été réalisés en laboratoire dans différentes conditions de température, vitesse et taux de déformation représentatives de procédés industriels. L'étude précise des *mécanismes de recristallisation dynamique*, ainsi que de leurs cinétiques, constitue la première partie de ce travail. La caractérisation fine des microstructures déformées a permis de mettre en évidence un nouveau mécanisme de recristallisation, qui se superpose aux autres mécanismes conventionnels. Dans ce mécanisme, dit de *recristallisation en hétéroépitaxie*, les germes résultent de la précipitation cohérente de phase γ au sein des précipités γ' primaires et produisent un grain recristallisé par précipité primaire, englobant le précipité et de même orientation. Les mécanismes conventionnels sont la recristallisation dynamique discontinue en collier et la recristallisation dynamique continue favorisée aux plus basses températures. L'interaction entre ces différents mécanismes ainsi que leurs cinétiques relatives ont été établies dans une vaste gamme de conditions de déformation. Une attention particulière a également été accordée à l'évolution de la phase secondaire γ' en régime dynamique. La deuxième partie de l'étude est consacrée à la stabilité des microstructures déformées lors de leur exposition à haute température. L'alliage René 65, comme d'autres alliages à base Nickel, est sensible à un phénomène indésirable dit de *croissance de grains hétérogène*, ou *éclatement de grains* selon la terminologie employée en milieu industriel. Les conditions de déclenchement de ce phénomène lors de traitements thermiques ont été déterminées, de manière à délimiter une fenêtre de forgeage critique. La dernière partie est consacrée à l'extension des conclusions académiques des deux premières parties. La caractérisation de disques forgés industriels confirme les mécanismes et domaines de déclenchement de la croissance hétérogène. Enfin, il est démontré que le mécanisme de recristallisation en hétéroépitaxie s'applique à d'autres alliages γ - γ' à base Nickel ayant un faible écart de paramètre de maille lorsqu'ils sont soumis à un chemin thermomécanique adéquat.

PhD thesis of Marie-Agathe CHARPAGNE

Safran Aircraft Engines, CEMEF Mines ParisTech



Microstructure evolution of the René 65 superalloy during forging operations

Polycrystalline Nickel-based alloys are widely used as components for rotative parts of jet engines submitted to extreme conditions (fatigue and high-temperature creep under high stresses in corrosive environment). Endlessly increasing objectives in terms of energy efficiency have led the engine manufacturers to increase their service temperature. As a consequence, Inconel 718 and similar alloys -that were used until now- cannot withstand such severe conditions anymore, and lack mechanical resistance at the increased temperature. René 65 is a new γ - γ' superalloy which has been designed specifically for that purpose by *General Electric*. It has been selected by *Safran Aircraft Engines* as the material for low-pressure turbine disks in the new LEAP engine. To reach the desired mechanical properties, a fine and homogeneous microstructure is required. The disks forging process is a complex sequence which involves alternated hot deformation stages and thermal treatments, during which the microstructure evolves. Although the underlying mechanisms governing the microstructure evolutions are quite known, their specific mechanism and kinetics may vary depending on the alloy. The aim of the present work is to determine the microstructure evolution of René 65 alloy during high-temperature forging operations, and its dependence on thermomechanical conditions.

Interrupted compression tests were conducted at laboratory scale under thermomechanical conditions (temperature, strain and strain rate) in accordance with the industrial process. In the first part, the focus is placed on the *dynamic recrystallization mechanisms*. Accurate characterization of the deformed microstructures has enabled to highlight a new recrystallization mechanism which superimposes with more conventional ones. It was named *heteroepitaxial recrystallization*, as a result of its singular nucleation mechanism: recrystallization nuclei result from coherent precipitation of γ phase from primary γ' precipitates. It generates a single recrystallized grain around each precipitate that, moreover, has the same crystallographic orientation. Other mechanisms such as discontinuous dynamic recrystallization involving necklace nucleation and continuous dynamic recrystallization, favored at low temperature, were also found to occur in this alloy. The interactions between those mechanisms as well as their relative kinetics have been established in a wide range of deformation conditions. Special care was also given to the evolution of γ' phase in dynamic regime. The second part of the study is dedicated to the stability of deformed microstructures when exposed to high temperature thermal treatments. René 65, as many other Nickel-based alloys, is subjected to the undesirable phenomenon of *heterogeneous grain growth* (also called *critical grain growth*), which leads to very heterogeneous microstructures containing abnormally large grains in a fine matrix. Critical deformation conditions leading to heterogeneous microstructures during subsequent annealing have been determined in an aim to identify the critical forging window which should be avoided. The last part draws the conclusions of the precedent academic ones and deals with their field of application. The characterization of industrially forged disks confirms the mechanisms found in laboratory scale samples as well as the thermomechanical domains that are sensitive to heterogeneous grain growth. Finally, it is demonstrated that heteroepitaxial recrystallization occurs in other γ - γ' Nickel-based alloys having a low lattice mismatch, when exposed to a suitable thermomechanical route.