Soutenance de thèse

Maxime PIRAS soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'ICA et intitulée *«Impact des défauts et de la microstructure biphasée sur le comportement en fatigue de l'acier inoxydable super duplex SAF 2507 élaboré par fabrication additive»*

Le 5 mai 2025 à 14h00

Salle Clément Ader à l'Institut Clément Ader - Toulouse

devant le jury composé de

M. Anis HOR	ISAE SUPAERO	Directeur de thèse
M. Eric CHARKALUK	CNRS/LMS	Codirecteur de thèse
M. Jean-Yves BUFFIERE	INSA Lyon	Rapporteur
M. Patrice PEYRE	ENSAM	Rapporteur
Mme Brigitte BACROIX	CNRS/LSPM	Examinatrice
M. Loic SIGNOR	ISAE ENSMA	Examinateur
Mme Marie-Christine SAINTE-CATHERINE	DGA/AID	Examinatrice

Résumé : La fabrication additive (FA) métallique connait un essor très important depuis quelques années. Les technologies de FA sont de plus en plus regardées comme des moyens de production à part entière. La FA peut servir, aussi bien, à fabriquer des pièces, qu'à fonctionnaliser des sous-ensembles complexes, ou encore à réparer des pièces de haute valeur ajoutée. Un état de l'art de la FA métallique permet de constater que seulement quelques alliages « classiques » ont majoritairement été employés : quelques aciers, des superalliages base nickel, des alliages de titane ou encore des alliages d'aluminium. Cela est essentiellement dû à la disponibilité des poudres métalliques et à la capacité des alliages à être mis en œuvre par ces procédés additifs. Peu nombreuses sont les études qui ont tenté d'élaborer les aciers inoxydables duplex par des procédés additifs. Ces études n'aboutissent pas à un consensus sur les paramètres optimaux des procédés. Les données sur les propriétés métallurgiques, mécaniques ou électrochimiques des aciers inoxydables duplex obtenues par voie additive furent rares et parfois contradictoires. La résistance à la fatigue de ces alliages n'a pas été abordée dans la littérature. Ces travaux de thèse proposent d'étudier la fabricabilité ainsi que les propriétés métallurgiques et mécaniques de l'acier super duplex SAF 2507 élaboré par fusion laser sur lit de poudre (FLLP). Le comportement en fatigue de cet acier est particulièrement analysé. Tout d'abord, l'étude de la fabricabilité a montré que des « petits » défauts (taille inférieure à 200 µm) sont toujours présents, malgré l'obtention d'éprouvettes denses. La microstructure brute est quasi-ferritique avec des traces d'austénite aux joints de grains. Une fois la microstructure optimisée, les propriétés mécaniques, et particulièrement en fatigue, du matériau brut sont supérieures à celles des microstructures issues des procédés conventionnels tels que le forgeage. Un TTH suivi d'une trempe suffit pour retrouver la microstructure biphasée tout en évitant la précipitation de phases néfastes (i.e. sigma). Le choix de la température et du temps de maintien permet de contrôler la morphologie et la taille des grains ainsi que le pourcentage de phase ferrite/austénite. La compression isostatique à chaud a permis de supprimer la plupart des défauts de fabrication. La sensibilité du comportement en fatigue, à la microstructure et aux défauts, est dépendante du mode de chargement. Le comportement en fatigue est plus sensible aux défauts pour la traction et à la microstructure pour la torsion. Les mécanismes d'amorçage et de propagation de fissures de fatigue ont été également identifiés expérimentalement. Les tailles de défauts à l'amorçage varient entre 20 et 70 µm. La propagation est mixte : intra-granulaire (dans les grains de ferrite ou d'austénite) et intergranulaire (entre les grains d'austénite et de ferrite). Enfin, des modélisations explicites de ces microstructures biphasées avec et

sans défauts ont été misent en place en utilisant la méthode des éléments finis. La plasticité cristalline est utilisée pour décrire le comportement mécanique à l'échelle mésoscopique (du grain ou du cristal). Des critères de fatigue multiaxiale sont utilisés pour définir des indicateurs de fatigue à cette échelle (mésoscopique). Ces indicateurs de fatigue permettent d'analyser l'amorçage des fissures de fatigue à l'échelle du grain. Une nouvelle limite de fatigue mésoscopique, sensible à la microstructure, est définie en utilisant les statistiques des valeurs extrêmes. L'influence de chacune des phases (austénite ou ferrite) sur la résistance en fatigue est également accessible par cette approche. La phase critique est dépendante de l'indicateur de fatigue considéré. L'effet plus important des défauts sur la limite de fatigue en traction qu'en torsion, ainsi que, l'effet bénéfique de la microstructure fine en torsion, sont en accord avec les observations expérimentales.
Mots-clés : Fatigue, Acier duplex, Fabrication additive, Défauts, Microstructure, Plasticité cristalline

Summary: Metal additive manufacturing (AM) has experienced significant growth in recent years. AM technologies are increasingly regarded as full-fledged production methods. AM can be used not only to manufacture parts but also to functionalize complex subassemblies or repair components. A state-of-the-art review of metal AM reveals that only a few "conventional" alloys have been predominantly employed: a selection of steels, nickel-based alloys, titanium alloys, and aluminum alloys. This is mainly due to the availability of powders and the ability of these alloys to be processed using AM technics.
Few studies have studied duplex stainless steels using AM processes. These studies have not reached a consensus on the optimal processing parameters. Data on metallurgical, mechanical, or electrochemical properties of duplex stainless steels produced via AM remain scarce and sometimes contradictory. Furthermore, fatigue behavior of these alloys has not been addressed in the literature.
This PhD thesis aims to investigate manufacturability, metallurgical and mechanical properties of SAF 2507 super duplex stainless steel fabricated via Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Special emphasis is placed on analyzing the fatigue behavior of this steel.
First, the manufacturability study revealed that small defects (with sizes below 200 µm) are always found, despite achieving dense material. As-built microstructure is nearly fully ferritic, with few austenite at grain boundaries. After process parameters optimization, mechanical properties, especially fatigue behavior, of this as-built microstructure are higher than those of microstructures produced through conventional processes such as forging.
A heat treatment (HT) followed by quenching is enough to restore the dual-phase microstructure while preventing the precipitation of deleterious phases (e.g. sigma phase). Holding temperature and time enable control over grain morphology and size, as well as ferrite/austenite phase ratio. Hot Isostatic Pressing (HIP) has made it possible to suppress most manufacturing defects.
Microstructure and defects sensitivities of fatigue behavior is dependent on the loading mode. Fatigue behavior is more sensitive to defects under tensile loading whereas it is more sensitive to microstructure in torsion. Fatigue crack initiation and propagation mechanisms have also been experimentally identified. Crack initiation responsible defect sizes range from 20 to 70 µm. Crack propagation is mixed: intragranular (within ferrite or austenite grains) and intergranular (between ferrite and austenite grains). Finally, dual-phase microstructure explicit modeling, with and without defects, was simulated using the finite element method. Crystal plasticity was employed to describe mechanical behavior at the mesoscopic scale (grain). Multiaxial fatigue criteria were used to define fatigue indicator parameters at this scale (mesoscopic). These fatigue indicator parameters provide insight into fatigue crack initiation at the grain scale. A new mesoscopic fatigue limit, sensitive to microstructure, was determined using extreme value statistics. This approach also enables the assessment of the influence of each phase (austenite or ferrite) on fatigue resistance. Phase criticality depends on the chosen fatigue indicator parameter. The higher effect of defects on fatigue limit in tension compared to torsion, as well as the beneficial effect of finer microstructures under torsional loading, are consistent with experimental observations.
Keywords: Fatigue, Duplex stainless steel, Additive manufacturing, Defect, Microstructure, Crystal plasticity.