

THÈSE

Pour l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : Science des Matériaux

Présentée par :

ANIS DOGHRI

Vers une maîtrise de la réparation par le procédé CLAD de pièces aéronautiques en Inconel 738 LC : compréhension des mécanismes de fissuration et modélisations associées

Thèse soutenue publiquement le 20 juin 2019 à Metz devant le jury composé de :

M ^{me} Muriel CARIN, Maître de conférences HDR, IRDL, Université de Bretagne-Sud	Rapporteuse
M ^{me} Sophie COSTIL, Professeure des universités, LERMPS, UTBM	Rapporteuse
M. Franck TANCRET, Professeur des universités, IMN, Université de Nantes	Examineur
M. Patrice PEYRE, Directeur de recherche, PIMM, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. Jean-Jacques BLANDIN, Directeur de recherche CNRS, SIMaP, Grenoble INP	Examineur
M. Pascal LAHEURTE, Maître de conférences HDR, LEM3, Université de Lorraine	Directeur
M. Marc THOMAS, Ingénieur de recherche HDR, ONERA	Co-directeur
M. Florent FOURNIER DIT CHABERT, Ingénieur de recherche, ONERA	Encadrant
M ^{me} Clara MORICONI, Ingénieure de recherche, Safran Tech	Invitée
M. Pierre ALVAREZ, Ingénieur, Safran Seats	Invité

Vers une maîtrise de la réparation par le procédé CLAD de pièces aéronautiques en Inconel 738 LC : compréhension des mécanismes de fissuration et modélisations associées

RÉSUMÉ :

Les superalliages à base de nickel durcis par précipitation γ' , et notamment l'Inconel 738 LC (IN738LC), sont des matériaux largement utilisés dans les parties chaudes de turbomoteurs d'avions et d'hélicoptères. Ces matériaux disposent d'excellentes propriétés mécaniques à haute température. Toutefois, des défauts ou des fissures peuvent apparaître sur ces pièces, lors de leur élaboration par fonderie ou bien pendant leur durée en service, ce qui nécessite leur réparation. Cependant, les pièces constituées en IN738LC sont sujettes à de la fissuration au cours des procédés de réparation de type soudage. Il s'avère que le rechargement laser est une technique de fabrication additive prometteuse permettant de réparer des pièces abimées. Le présent travail consiste en l'étude de la réparabilité par projection de poudre de l'alliage IN738LC réputé non soudable. Cette étude comporte deux volets expérimentaux et numériques du rechargement de pièces en Inconel 738 LC au moyen du procédé CLAD. Pour cela, nous avons réalisé des essais de rechargement suivant plusieurs configurations illustrant les cas de réparations rencontrés industriellement. Deux mécanismes de fissuration distincts sont mis en évidence respectivement dans la zone affectée thermiquement du substrat et dans le dépôt. Une simulation multi-physique est également développée pour rendre compte des phénomènes thermiques, mécaniques et métallurgiques observés lors du rechargement laser. Ces simulations sont comparées à des mesures expérimentales pour validation. Enfin, ces outils de simulation sont utilisés afin de définir des critères numériques de risque de fissuration. En résumé, un préchauffage à haute température permet d'éliminer le risque de liquation et donc de fissures dans la ZAT ainsi que dans les dépôts, ce qui démontre qu'il est possible d'envisager une réparation sur cet alliage réputé non soudable.

Mots-clés : superalliage, nickel, rechargement laser, fissuration, simulation numérique

Towards the control of the CLAD repair process for aeronautical parts in Inconel 738 LC : understanding of cracking phenomena and numerical modelling

ABSTRACT :

γ' hardened nickel-based superalloys, such as Inconel 738 LC (IN738LC), are materials which are extensively used in hot sections parts of helicopter and aircraft engines. Those materials exhibit enhanced mechanical properties at high temperature. Nevertheless, cracking and several defects can occur on these parts during casting or during their service life. However, welding type repairing processes can lead to considerable cracking of IN738LC superalloy. It appears that laser cladding is a promising additive manufacturing technology which allows the repair of damaged parts. The present work main objective is aimed at investigating Inconel 738 LC repair by laser cladding. Both experimental and numerical aspects are studied for the repair of IN738LC by means of the CLAD process. Experimental laser clad deposits are produced under several configurations following industrial cases. Two distinct cracking mechanisms are identified in the heat-affected zone and within the deposit, respectively. A multi-physics simulation of laser cladding is developed in order to take into account thermal, mechanical and metallurgical phenomena. Simulation is compared to experimental measurements for validation. Finally, these numerical tools are used to define cracking risk criteria. In summary, a high preheating of the samples allows to suppress liquation and HAZ cracking, but also to obtain un-cracked deposit, which indicates that the repair of non-weldable alloys is possible.

Keywords : superalloy, nickel, laser cladding, cracking, numerical simulation