

Ecole virtuelle ALMA 2023

Première session – Vendredi 26 Mai 2023, 14h-15h30

Sélia Benmabrouk (GPM Rouen) : Influence du procédé de fabrication sur le comportement à rupture d'un alliage nickel-chrome élaboré par méthode conventionnelle et fabrication additive (L-PBF)

Résumé - Le comportement à rupture des alliages base-nickel élaborés de manière conventionnelle est depuis longtemps étudié dans le cadre du dimensionnement des structures en service. Le but principal de cette démarche est de prévenir toute rupture prématurée, notamment dans les domaines aéronautique, nucléaire et maritime. Cependant l'essor de la fabrication additive, qui confirme son potentiel et l'inscrit durablement comme un procédé d'avenir, soulève aussi de nombreuses problématiques en termes de mécanique de la rupture. En effet, le vaste choix de paramètres d'élaboration ainsi que l'histoire thermique subie par une pièce lors de sa fabrication induisent des microstructures complexes en raison de forts gradients thermiques, lesquelles vont influencer les mécanismes de propagation de fissure.

Dans le cadre de ces travaux, l'attention est portée sur le comportement à rupture d'un alliage nickel-chrome élaboré par fusion laser sur lit de poudre (L-PBF). Trois paramètres de fabrication ayant une influence de première ordre sur la microstructure sont investigués : la direction de fabrication (horizontale et verticale), l'angle entre les couches de lasage (67° et 90°), et la densité d'énergie volumique (60 J/mm³, 90 J/mm³, 120 J/mm³). Le matériau coulé est étudié pour constituer une base de données de référence représentative des méthodes de fabrication conventionnelles. Des essais de flexion trois points sont menés classiquement en accord avec la norme ASTM E1820, portée sur les matériaux métalliques ductiles. Une comparaison de la ténacité, c'est-à-dire la résistance à la propagation de la fissure, est alors réalisée entre les différentes configurations de fabrication. Des observations microstructurales sont effectuées à différentes échelles afin de retracer le chemin de la fissure et comprendre les mécanismes physiques à l'origine des comportements obtenus.

Jacques Besson (Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, Mines Paris, PSL-Université) : Mesure de la ténacité des alliages métalliques

Résumé - La ténacité caractérise la résistance à la fissuration des matériaux. Elle est nécessaire pour le dimensionnement des structures vis-à-vis d'une rupture brutale. Celle-ci survient généralement à la suite d'une fissuration amorcée par fatigue ou corrosion. La détermination de la ténacité repose sur des normes dont les plus employées sont la norme ASTM E399 et la norme ASTM E1820. La première porte sur la rupture fragile en plasticité confinée. La seconde porte sur la rupture en plasticité généralisée fragile ou ductile. Dans ce dernier cas, la procédure E1820 permet de prendre en compte l'avancée stable d'une fissure. Les éprouvettes employées sont de type Compact Tension (CT) ou Single Edge Notch Bend (SENB). De nouvelles géométries comme l'éprouvette Single Edge Notch Tensile (SENT) ont été plus récemment proposées (voir par exemple la norme BS8571) pour tenir compte des effets de géométrie sur les propriétés mesurées. Les normes permettent en particulier de déterminer les courbes $J-\Delta a$ (où J est l'intégrale de Rice et Δa l'avancée de fissure) par la méthode des décharges partielles de sorte à utiliser une seule éprouvette.

Les normes définissent des limites permettant de considérer un essai comme « valide » ; c'est-à-dire transposable vers une structure. La principale limite vient alors de la taille de la zone plastifiée R_p (E399) ou de la zone d'élaboration de la rupture RPZ (E1820) par rapport à la taille de l'éprouvette. Celle-ci doit être largement plus petite que R_p ou RPZ selon le cas considéré. Il existe pourtant de nombreux cas pour lesquels il est en pratique impossible de réaliser un essai « valide » : (i) matériau très tenace, (ii) matériau sous forme de tôle d'épaisseur faible, (iii) matériau disponible en très faible quantité (matériau expérimental, matériau irradié, matériau extrait d'un prélèvement in-situ). Dans tous ces cas, il conviendrait de proposer des approches permettant de dépasser les limites fixées par les normes.

Les normes citées plus haut ont principalement été développées à partir des années 70 en particulier dans le cadre du développement des réacteurs nucléaires. Elles ont été ensuite employées dans les domaines du gaz et du pétrole. Elles sont donc bien adaptées aux structures épaisses en acier. Leur application à de nouveaux matériaux, comme ceux issus de la fabrication additive, reste donc un défi.

Deuxième session – Mardi 20 Juin 2023, 14h-15h30

Mathieu Lalé (CIRIMAT, Toulouse) : Etude de l'évolution microstructurale du TA6V issu de fabrication additive au cours d'essais de Small Punch Test

Résumé - La fabrication additive a connu un essor sans précédent au cours des 20 dernières années. Parmi les procédés de fabrication additive la fusion laser sur lit de poudre dénommée L-PBF fait partie de ceux les plus utilisés. Ce procédé induit des vitesses de refroidissement très rapides et entraîne la formation de microstructures hors équilibre ainsi que des contraintes résiduelles élevées. Le TA6V issu de ce procédé possède une microstructure de type martensitique avec des ex-grains beta très grossiers et allongés suivant la direction de fabrication. Le plus souvent des traitements thermiques de détensionnement sont appliquées. Typiquement pour le TA6V un traitement de 2h à 700°C est appliqué. Au cours de ce traitement la martensite se décompose en alpha + beta. L'effet de la plasticité sur cette décomposition pour des température au-dessus de 600°C a pu être mise en évidence dans la littérature. Cependant, cette décomposition n'a pas été caractérisée pour des températures plus faibles. Par ailleurs, les effets de la déformation plastique sur la décomposition de la martensite ne sont pas très bien décrits.

Les essais de Small Punch Test ont été développés au cours des années 80. Ils consistent à réaliser un essai de poinçonnage au moyen d'une bille de 2.5 mm de diamètre sur un échantillon de 10 mm de diamètre et 0.5 mm d'épaisseur. Ces essais permettent d'estimer les propriétés normalement obtenues par un essai de traction uniaxiale à vitesse imposée (essais notés SPT) ainsi que par un essai de fluage uniaxial (Small Punch Creep Test ou SPCT). Ils permettent également de réduire les quantités de matière utilisées tout en simplifiant les méthodes de prélèvements. L'état mécanique au sein de l'échantillon n'est pas uniforme au sein de l'échantillon.

Dans cette étude, nous cherchons à étudier les propriétés mécaniques du TA6V brut de fabrication additive par SPT tout en étudiant des effets d'orientation. Des essais SPCT ont été réalisés entre 300 MPa et 450MPa et pour des températures allant de 400°C à 500 °C. A l'issue du fluage, l'évolution de la microstructure au sein de l'échantillon est étudiée et est mise en relation avec les états mécaniques locaux.

Moukrane Dehmas (CIRIMAT, Toulouse) : Cinétique d'évolutions microstructurales dans l'alliage de titane Ti-6Al-4V élaboré par fabrication additive

Résumé - Les procédés de fabrication additive sont aujourd'hui de plus en plus utilisés dans l'industrie aéronautique. Parmi les différentes technologies existantes, le procédé par fusion laser sur lit de poudre (SLM, Selective Laser Melting) ainsi que le procédé de fusion par faisceau d'électrons (EBM, Electron Beam Melting) semblent les plus promoteur pour la conception de pièces en alliage de titane Ti-6Al-4V permettant ainsi des économies considérables en matière et en temps de fabrication. Néanmoins, les sollicitations thermomécaniques lors de la fabrication impactent grandement la microstructure, les propriétés mécaniques et la qualité des pièces. En effet, durant le procédé SLM, les vitesses de refroidissement rencontrées lors de la fabrication conduisent à une microstructure martensitique α' et génèrent des contraintes résiduelles susceptibles de provoquer des distorsions et/ou d'initier des fissures. De fait, un traitement thermique post-fabrication est nécessaire. Dans cet exposé sera présenté des travaux portant les mécanismes de décomposition de la martensite α' dans l'alliage de titane Ti-6Al-4V produit par SLM lors d'une sollicitation thermique. La démarche que nous avons adoptée a été de suivre in situ les cinétiques d'évolutions microstructurales par diffraction des rayons X à haute énergie. Outre les aspects cinétiques, nous discuterons, au travers de l'analyse combinée des paramètres de maille moyens et des largeurs à mi-hauteur (FWHM) déterminés par affinement Rietveld à partir des pics de diffraction, des mécanismes successifs de restauration et de décomposition de la martensite α' lors du chauffage. L'accent sera porté sur l'influence de la vitesse de chauffage et le temps de maintien sur les cinétiques de restauration et de décomposition des phases initiales. L'influence de la microstructure initiale et de la stratégie de fabrication sera également discutée dans une moindre mesure.

Troisième session – Mardi 04 Juillet 2023, 10h30-12h

Théo Zurcher (LMS – X et LTDS – Ecole Centrale de Lyon) : Etude tribologique de l'IN718 mis en forme par Laser Metal Deposition (LMD)

Résumé - Pour des raisons principalement économiques, une grande partie des pièces métalliques usées sont réparées afin de leur donner une seconde vie. Il existe d'ores et déjà de nombreux procédés qui permettent de réparer de manière plus ou moins précise des pièces métalliques (soudage à l'arc, projection thermique, cold spray, etc.). Depuis l'apparition des procédés de fabrication additive (FA), la famille des procédés Directed Energy Deposition offre également la possibilité de restaurer ou recharger des pièces usées. Ces réparations se doivent d'être durables et capables d'avoir au minimum les mêmes propriétés mécaniques qu'une pièce neuve. Or, il s'avère que la résistance à l'usure de ces réparations est un sujet encore très peu étudié. C'est pour cela qu'une étude de la tenue à l'usure, centrée sur un matériau communément étudié en FA (IN718), a été entreprise afin d'évaluer la capacité du procédé LMD à réaliser des réparations durables. Cette intervention présentera les résultats obtenus lors de l'usure de revêtements épais en IN718 déposés par LMD. Ces travaux ont pour but de comprendre comment les paramètres de fabrication (notamment la stratégie de balayage du laser), les conditions tribologiques (force normale, vitesse de glissement...) ainsi que l'environnement jouent un rôle sur la tenue à l'usure de ces réparations.

Vincent Fridrici (MCF, LTDS – Ecole Centrale de Lyon) : Introduction à la Tribologie

Résumé - La Tribologie est la science du frottement, de l'usure et de la lubrification. Son importance est grande dans de nombreux secteurs industriels (transport, énergie, santé...) où les contacts frottants ont un impact sur l'efficacité et la durabilité des systèmes mécaniques, via les pertes par frottement et les phénomènes d'usure. L'étude d'un contact frottant fait intervenir différentes échelles spatiales et temporelles et nécessite une approche multidisciplinaire (mécanique, matériaux, physico-chimie...).

Dans cet exposé, on rappelle les bases du frottement (composantes adhésive et de labourage), les principaux modes d'usure (abrasion, adhésion, usure physico-chimique, usure par fatigue) et des lois d'usure fréquemment utilisées. A travers quelques exemples, on illustre la méthodologie d'analyse d'un problème tribologique et des solutions matériaux permettant de limiter frottement et/ou usure.

Quatrième session – Jeudi 5 octobre 2023, 14h-15h30

Juliette Théodore (GEM, Nantes) : Détermination des contraintes résiduelles par diffraction neutronique et par la méthode du contour – Application aux cas d'assemblages d'aciers inoxydables multimatériaux soudés par procédé DW-TIG et perspectives pour le WAAM

Résumé – L'assemblage de tôles ou de tubes métalliques de forte épaisseur nécessite de chanfreiner les pièces et de réaliser l'opération de soudage en multipliant les passes. Des phénomènes physiques complexes sont alors mis en jeu ; phénomènes thermiques, mécaniques et métallurgiques. En particulier, les cycles thermiques imposés ainsi que les cycles mécaniques induits lors du soudage sont responsables de la formation de contraintes et de déformations résiduelles. Les contraintes résiduelles ainsi créées sont particulièrement problématiques, puisque, ajoutées aux contraintes extérieures imposées aux pièces en service, celles-ci peuvent diminuer la tenue mécanique des pièces et augmenter les risques de défaillance. Quant aux déformations, celles-ci sont à exclure, ou pour le moins à minimiser, notamment pour éviter les défauts d'alignement lors d'une séquence de soudage. Généralement, lors des opérations de soudage, le métal d'apport utilisé est proche ou identique à au moins un des métaux de base des pièces à assembler. De plus, une composition chimique unique du métal d'apport est utilisée.

Il est proposé ici de modifier la répartition des déformations et des contraintes, et si possible de les diminuer, en introduisant une seconde composition de métal d'apport (ferritique 430 ou martensitique 415), possédant des propriétés thermiques et/ou mécaniques significativement différentes du premier fil et du métal de base de la tôle (austénitique 304L). Les pièces ont été réalisées soit par **architecture** du joint soudé, c'est-à-dire par alternance de dépôts des deux fils d'apport, cordon par cordon, soit par **gradient de composition**, c'est-à-dire par mélange *in situ* des deux fils en faisant varier graduellement la proportion de l'un par rapport à l'autre le long de l'épaisseur du joint soudé.

Les contraintes résiduelles déterminées par la méthode du contour et la diffraction neutronique seront présentées et comparées au cas de référence, c'est-à-dire à un assemblage soudé avec uniquement un seul fil d'apport de même composition que le métal de base. Ces résultats seront mis en perspective avec les mesures de déformation par profilométrie laser, et la détermination des phases en présence par EBSD et/ou DRX.

Charles Mareau (ENSAM Angers) : Analyse des contraintes par diffraction des rayons X et perçage incrémental : principes, avantages et limites

Résumé - Les contraintes résiduelles issues de la fabrication additive des pièces métalliques peuvent engendrer des distorsions géométriques ou affecter la résistance mécanique, en particulier à la fatigue ou à la corrosion sous contrainte. Afin de décider des éventuels post-traitements à mettre en œuvre ou pour intégrer les contraintes résiduelles dans une démarche de dimensionnement, il est nécessaire de disposer de techniques expérimentales d'analyse des contraintes. Dans cet exposé, on discutera de l'utilisation du perçage incrémental et des techniques de diffraction des rayons X pour l'analyse des contraintes. Spécifiquement, au travers de quelques exemples illustratifs, les stratégies de mesure et les méthodes d'analyse propres à ces deux techniques seront exposées. Un accent particulier sera mis sur les précautions expérimentales à considérer lors de l'application de ces méthodes. Aussi, les avantages des différentes techniques, ainsi que les limites, seront également évoqués. Cela permettra de souligner le caractère complémentaire, plutôt que concurrentiel, de ces deux méthodes.

Cinquième session – Jeudi 19 octobre 2023, 14h-15h30

Meher Zaied (UTBM -- ICB-LERMPS) : Incidence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques magnétiques des pièces ferromagnétiques en Fe6.5%Si produites par FA - FLLP

Résumé - Parmi les matériaux ferromagnétiques, le Fer-silicium FeSi, avec des teneurs de Si > 6% en masse, présente des propriétés magnétiques intéressantes pour électrotechnique. Néanmoins, si l'intérêt de travailler avec une teneur en Si supérieure aux matériaux ferromagnétiques classiques (> 3% en masse) peut permettre d'améliorer les caractéristiques de l'acier ferromagnétique fabriqué, cette augmentation entraîne une réduction de sa ductilité. L'utilisation de la FA - FLLP pour la fabrication des pièces en Fe6.5%Si a montré qu'il est possible d'améliorer la ductilité, notamment, grâce aux vitesses de refroidissement rapides qui sont propres au processus de solidification dans ce type de procédé. Cette influence entre vitesse de refroidissement et ductilité montre qu'il est important d'identifier les paramètres procédé qui ont une influence directe sur les caractéristiques magnétiques et mécaniques des échantillons et pièces fabriquées. Dans cette présentation, nous allons montrer notre travail sur la caractérisation microstructurale et les liens que l'on peut établir avec les caractéristiques magnétiques des échantillons dans le but de comprendre les relations paramètres procédés / microstructures / propriétés magnétiques.

Alejandro Ospina Vargas (UTC -- Roberval) : Enjeux et perspectives de la fabrication additive (FA) des matériaux magnétiques par fusion laser sur lit de poudre (FLLP)

Résumé - Des travaux de recherche sur la fabrication de matériaux ferromagnétiques par FA montrent, sur différents alliages ferromagnétiques, qu'il est possible d'atteindre des propriétés magnétiques (conditions statiques) proches de celles obtenues sur des pièces issues des procédés usuels (laminage). Cependant, la plupart des applications électrotechniques courantes nécessitent l'utilisation des matériaux magnétiques soumis à un champ magnétique variable à des fréquences supérieures à 50Hz (conditions dynamiques) pour lesquelles les matériaux magnétiques obtenue par FA ne sont pas encore satisfaisants. Dans cette présentation nous allons, d'une part, faire un état de l'art sur l'application de la FA-FLLP pour la fabrication des matériaux ferromagnétiques pour mieux saisir les enjeux de la recherche actuelle sur le sujet et d'autre part, analyser les perspectives afin d'atteindre

des performances statiques et dynamiques comparables à celles de matériaux classiques utilisés actuellement dans les applications électrotechniques

Sixième session – 8 novembre 2023, 14h-15h30

Paul Martin (Mines Paris – PSL, CEMEF \ Safran Additive Manufacturing) : Transformations de phases en solidification rapide – Application aux alliages multicomposés pour le procédé L-PBF

Résumé - La fusion laser sur lit de poudre (L-PBF) est un procédé d'intérêt pour l'industrie aéronautique dans l'objectif de développer de nouveaux composants moteur. Néanmoins, pour garantir la fiabilité et la durabilité des pièces produites par ce procédé, il est nécessaire de limiter l'apparition de tout défaut et, en particulier, ceux liés à la fissuration lors de la solidification. Ces fissures sont causées par la présence d'un film liquide entre les grains lors des dernières étapes de solidification, ainsi que par les contraintes et les déformations subies par la zone pâteuse. Un modèle de microségrégation compatible avec les procédés L-PBF et capable de prédire le chemin de solidification serait ainsi d'un intérêt certain. En réponse à ce besoin industriel, un nouveau modèle est proposé et appliqué dans les conditions de refroidissement rencontrées en L-PBF, incluant l'étape initiale de solidification et permettant le suivi des transformations de phases et de leur composition dans la région liquide interdendritique. La cinétique de croissance dendritique, incluant les effets de diffusion croisée, est ainsi intégrée à ce modèle. De même, l'écart à l'équilibre thermodynamique de l'interface, déterminé à travers la définition d'un diagramme de phase hors équilibre, modifié par les effets cinétiques et couplé avec l'approche CALPHAD est considéré. Une application sera proposée sur l'alliage IN738, un superalliage base-nickel largement utilisé dans l'industrie aéronautique. Ce modèle doit, à terme, permettre de déterminer le domaine de fissuration et l'apparition de phases à bas point de fusion.

Gildas Guillemot (Mines Paris – PSL, CEMEF) : Développement des microstructures dans les procédés de fabrication additive

Résumé - Les procédés de fabrication additive (FA) par fusion se caractérisent par un apport de matière réalisé par passage à l'état liquide d'une poudre ou d'un fil fusible. Ils présentent une grande diversité technique et technologique, en réponse aux besoins industriels. Ces procédés se distinguent cependant par le développement rapide des microstructures de solidification, dans des conditions de gradients thermiques et de vitesses de refroidissement importants. De plus, les structures de solidification se développent sur les précédents dépôts, dans le cadre de processus de croissance épitaxiale, prenant ainsi appui sur les grains précédemment formés. En complément, les mécanismes de germination conduisent également à l'apparition de nouveaux grains dans le bain liquide en surfusion. Les cinétiques de croissance dendritique doivent, ainsi, être précisément définies en considérant les propriétés des alliages d'études et les conditions locales de croissance et, notamment, les équilibres interfaciaux. Une compétition de croissance s'établit ensuite, conduisant à un processus de sélection, dépendant des orientations cristallographiques propres aux grains, et à la direction locale du gradient thermique. Il en résulte la formation d'une microstructure généralement texturée et fortement anisotrope, caractéristique des procédés FA. Cette microstructure spécifique a, ainsi, plusieurs conséquences, tant sur la survenue des défauts, que sur les capacités de contrôle CND ou les propriétés d'usage des pièces. La compréhension des mécanismes physiques conduisant à son développement est ainsi nécessaire pour proposer des modèles pertinents de croissance, permettant

une représentation fiable de l'état final du matériau. La présentation proposée va ainsi revenir sur les phénomènes physiques associés au développement des structures de grains dans les procédés FA, les modèles de croissance rapportés dans la littérature et les résultats obtenus aux différentes échelles d'intérêt.