

ALMA

Alliages métalliques par/pour
la fabrication additive

CNRS GDR 2089

Workshop GDR ALMA des Groupes de Travail Synthèse – Table ronde

GT3 : Matériaux par la FA

Christophe COLIN (Mines Paristech) & Guilhem MARTIN (Université de Grenoble)

GT4 : Propriétés mécaniques

Salima BOUVIER (UTC) & Etienne PESSARD (ENSAM)

5 - 6 Novembre 2020

- **Favoriser les échanges scientifiques et créer du lien** parmi la communauté des scientifiques intéressés par la FA
- Faire émerger des **projets novateurs et transversaux** aux frontières des propriétés conventionnelles des alliages obtenus par voie classique / traditionnelle
- **Recenser et organiser les plateformes expérimentales** en favorisant les recherches académiques amont
- **Former les jeunes chercheurs en science des matériaux**, en mécanique et en ingénierie des procédés, aux problématiques liées à la FA
- Contribuer aux efforts de redynamisation et d'attractivité de la métallurgie et de ses métiers vis-à-vis des étudiants et des jeunes chercheurs.

245 permanents – 34 laboratoires/organismes

Axes d'intérêt en lien avec les GT3 & GT4

▪ Volet Matériaux

→ Spectre des matériaux étudiés :

- Alliages d'aluminium : Al-Si10Mg, AlSi7Mg0.6, AA6061, AA2024...
- Aciers inoxydables 17-4PH, 304L, 302, 316L
- Aciers d'outillage (H13, Maraging M300, 42CD4, X15TN,...)
- Alliage base Nickel (Ni20Cr, IN718, AD730, C263, IN625, René77, Hastelloy X...)
- Alliage base Cobalt
- Alliages base Ti (e.g. TA6V)
- Alliages base Cu

→ Matériaux d'intérêt pour des études futures & nouveaux alliages pour la FA

- Intermetalliques TiAl
- Alliages à haute entropie (HEA)
- Alliages métalliques amorphes (verres métalliques)
- Bimatériaux et Matériaux à gradient de composition chimique → GT2
- Nouvelles compositions d'alliages → GT2

Choix de matériaux en
dehors des
problématiques de PI ou
confidentialité...

→ Comportement d'un matériau selon le procédé

→ Comment adapter la composition d'un alliage métallique pour la FA → GT2

Axes d'intérêt en lien avec les GT3 & GT4

▪ Volet Effets liés aux procédés sur les microstructures et les propriétés d'usage

→ Contrôle de la thermique (vitesse de solidification et Gradient thermique) :

- Améliorer les microstructures lors de l'élaboration , limiter les contraintes résiduelles...
- Eviter les traitements de parachèvement
- Design des microstructures (e.g. équiaxes, colonnaire)

→ Effets des paramètres du procédé sur les microstructures (e.g. gaz protecteur, recyclage des poudres...)

→ Liens Microstructure / Ecrouissage, effet de la précipitation, interaction écrouissage cinétique de précipitation

→ Effets associés aux parois minces sur les microstructures

Echelles d'investigations des microstructures (apport de la modélisation ?) :

→ *Aspects ségrégations chimiques ? Lien avec la nature du procédé ? Effet des traitements post-FA ?*

→ *Quid des textures cristallographiques ?*

→ *Aspects structurations des défauts (e.g. cellules de dislocations...) → Lien avec l'écrouissage, réponse du matériau selon le trajet de déformation...*

Axes d'intérêt en lien avec les GT3 & GT4

▪ Volet Défauts, porosité, fissuration

- Critères de fissuration
- Réduction des défauts et des porosités (manque de fusion, gaz occlus,...)
- Défauts dans le cas de parois minces (matériaux architecturés)
- Comment contrôler la fissuration par la maîtrise de la thermique
- Défauts à cœur, défauts en surface et effet sur la tenue mécanique
- Impact des défauts sur l'amorçage et la propagation
- Compréhension des interactions type de défauts/microstructure/contraintes résiduelles/fatigue

▪ Volet Caractérisation

- Microstructures : Apports des différentes techniques de caractérisation des microstructures : Spectre large d'outils de l'échelle atomique à l'échelle macroscopique (mm)
- Contraintes résiduelles : spectre large avec utilisation des grands instruments
en surface (diffraction RX) et en volume (diffraction de neutrons)
- Caractérisation mécanique :
 - Essai statique, fatigue, fluage, ténacité, charpy, durée de vie...
 - Essais sous environnement
 - Essais en température (cryogénique et haute température)
 - Sensibilité de la réponse mécanique à la nature du défaut (e.g. manque de fusion versus apport gazeux)
 - Absence d'essais de caractérisation en dynamique ou ultradynamique ? Les effets de microstructures observés sur les procédés issues de FA sont-ils similaires à ceux observés sur les procédés classiques
 - Quid de la caractérisation par nanoindentation, micropillar...

Axes d'intérêt en lien avec les GT3 & GT4

▪ Volet Traitements & Fonctionnalisation des composants

- Optimisation des TTH post-FA pour faire évoluer les microstructures et/ou relaxer les contraintes résiduelles
- TTH en cours de fabrication
- Revêtements, y compris sur des structures lattices
- Traitements de surface
- Fonctionnaliser le composant lors de l'élaboration (e.g. améliorer les performances tribologiques, multiphysique)
- Réparation (rechargement local)

▪ Volet Modélisation

- A différentes échelles, différents types de modélisation (phénoménologique, plasticité cristalline...)
- Développement d'outils académiques versus logiciels métiers (e.g. Comsol)
- Modélisation des dépôts
- Modélisation de la genèse des microstructures
- Développement de méta-modèles pour le design des microstructures
- Les données d'entrée dans les modèles, notamment données en température, propriétés thermophysiques solide et liquide
- Validation des modèles

▪ Volet Matériaux architecturés & Lattice

- Microstructure
- Aspect modélisation
- Tenue mécanique, développement des critères en fatigue
- Réduction des défauts au cours de la fabrication
- Structure lattice pour le contrôle de l'écrouissage
- Fonctionnalisation de composants, e.g. lattice+polymère pour l'amortissement...

Besoins exprimés

- Accessibilité aux équipements de FA instrumentée ou « instrumentables » pour la validation des modèles (Besoins de données expérimentales pour la modélisation) → **recensement des équipements en distinguant bain/machine et nature de l'instrumentation**
- Détermination des contraintes résiduelles
- Cas de référence pour la validation des modèles & Données « fines » pour la validation des modèles
- Genèse des microstructures dans des matériaux à gradient de composition chimique
- Fabrication additive multimatériaux
- Paramétries pour les nouveaux alliages, quelle méthodologie ?
- Intérêt pour l'hybridation des procédés
- Procédés FA dans le domaine de la « réparation » → Propriétés à l'interface
- Comparaison des procédés
- Nécessité de développer des connaissances sur la métallurgie en FA → Créer une bibliothèque
- Créer une base de données sur la variabilité → Préparer des données pour le machine learning et l'IA
- Caractériser et comprendre la variabilité, e.g. cas des structures lattices, propriétés des bras très différentes
- Comportement dans le cas d'éprouvette laboratoire versus composant industriel
- Faire des expérimentations de genèse de microstructures in situ en FA ? Expérimentation de cyclage thermique rapide

- Design d'alliages → GT2
- Instrumentation des procédés, stratégie de pré- et post-chauffage → GT1

Procédés de FA présentés

Procédés directs :

Fusion sur lit de poudre par faisceau laser :

- Procédé LPBF (Laser Powder Bed Fusion) ou LBM (Laser Beam Melting) ou LPBM (Laser Powder Beam Melting)

Fusion de jet de poudre :

- Procédé LMD (Laser Metal Deposition) ou Procédé Arc + DED (Direct Energy Deposition) ou DMD (Direct Metal Deposition)

Fusion sur lit de poudre par faisceau d'électrons :

- Procédé EPBF (Electron Powder Bed Fusion), EBM (Electron Beam Melting) : lit de poudre + faisceau d'électrons

Fusion d'un fil :

- Procédé WAAM-CMT, WAAM équipé MIG-MAG ou WAAM équipé TIG-EWM

Procédés indirects avec liant polymère

- MBJ (Metal Binder Jetting)
- Robocasting

Procédés hybrides

- Procédés de fusion + cold spray

Quelles types d'instrumentation dispose-t-on ?

→ Mesure de la thermique, mesure de la sensibilité, mesure de fumée de vapeur, mesure de la contamination (taux d'oxygène), mesure du profil du bain...

Quelles types de matériaux ?

Distinguer entre bancs/machines industrielles, machines ouvertes, semi-ouvertes...

Formats de collaboration

- Co-encadrements de thèse : financements région ? Thèses ministérielles ?
- Mobilité de doctorants, post-doctorants en cours → Publications communes
- Disponibilités des moyens de fabrication (bancs, machines)
- Dépôts de projets ANR, H2020 ou autres
- Organisation d'écoles thématiques pour les doctorants
- Organisation de journées thématiques
- Partager des résultats sur un sujet commun, e.g. A-t-on des problématiques spécifiques à la nature du procédé ? → Prendre un matériau modèle (le choix du matériau dépend des verrous scientifiques visées) et examiner l'effet associé à la nature du procédé, effets sur les microstructures
- Mise en place de Benchmark, e.g. faire des essais mécaniques sur des éprouvettes issues de différentes machines → **Grande difficulté de mise en place d'un benchmarck. L'intérêt du banchmarck est d'identifier des tendances, des encadrements de type de défauts...**
- Publication commune état des lieux actuel (niveau d'instrumentation, niveau de modélisation...)
- Mise en place d'une bibliothèque de défauts (défauthèque) : dégager des grandes tendances, type de défauts, forme de défauts, défaut en volume et surface... pour alimenter les modèles → **Préparer des données pour le machine learning et l'IA**