



JANVIER 2019

FABRICATION ADDITIVE Matériaux, Métallurgie et Conception

Bonjour à chacune et chacun d'entre vous et bonne année 2019 !

Pour cette rentrée et après avoir abordé les principales technologies liées à la fabrication additive, nous continuons notre trilogie sur cette thématique en consacrant toute une newsletter aux matériaux métalliques utilisés avec ces procédés de fabrication. Nous clôturerons par un chapitre sur la nécessité de repenser la conception avec ces moyens de fabrication qui repoussent les limites en termes de design des pièces.

Les matériaux métalliques

Comme nous l'avons déjà souligné, qu'il s'agisse d'une technologie lit de poudre ou projection, ces procédés ont tous en commun l'utilisation de poudres métalliques. Par conséquent, tous les matériaux métalliques susceptibles d'être atomisés sous forme sphérique peuvent être utilisés :

- Les métaux purs (Cu, Fe, Au, Ti, Ta, ...),
- Les superalliages base Ni ou Co (Inconel 625 ou 718, Hastelloy X, Nimonic 263...),
- Les bases fer (X110CrMoVA1 8-2, acier rapide M2, nuances inoxydables : 410, 304, 316L, 15-5PH, 17-4PH, aciers maraging (X3NiCoMoTi18_9-5) ; ...),
- Les nuances d'aluminium (AS7G06 et AS10Mg, AlSi7Mg, AlSi12),
- Les alliages de titane (Ta6V, TA6V ELI, titane grade 2, Ti6Al7Nb, Ti24Nb4Zr8Sn).

Il existe un assez large spectre de matériau qui reste cependant toujours trop restreint à date pour l'ensemble des applications où la FA semble prometteur. On peut ajouter les quelques études concernant l'élaboration par SLM par FA de composite à matrice métallique (TiC dans une matrice base titane).

La géométrie des poudres utilisées est primordiale au niveau des procédés de FA. On attend d'une poudre :

- Une « parfaite » sphéricité, afin de favoriser l'écoulement et une densité de compactage maximale,
- Un spectre granulométrique reproductible et resserré (45 - 90 μm), afin de s'assurer une fusion complète de la poudre pour une quantité d'énergie donnée. Il est possible de trouver une proportion non négligeable de poudre micrométrique (< 5 μm) pour augmenter la capacité du produit formé,
- Un taux d'humidité inférieur à 5%, pour des questions de coulabilité,
- Une stabilité métallurgique au moment de sa projection (exemple : l'aluminium s'oxydant facilement, il y a risque de retrouver des inclusions d'alumine dans la pièce finale. Un contrôle atmosphérique est de ce fait nécessaire).

Il n'est cependant pas simple de garantir à 100% qu'un lot de poudres puisse satisfaire à 100% le cahier des charges matières nécessaire à une production de qualité.



JANVIER 2019

L'état métallurgique des poudres initiales est également un facteur important : une étude a démontré que deux poudres d'acier 17-4 PH fournies par des fabricants différents, de composition chimique pourtant identique, n'étaient pas dans le même état : l'une était martensitique et l'autre austénitique. Les pièces réalisées avec ses deux poudres n'ont de ce fait pas eu des microstructures similaires : l'une était austénitique et l'autre était à 40% martensitique et à 60 % austénitique, influençant nécessairement les propriétés mécaniques finales.

Il est aussi intéressant de souligner qu'il est possible de récupérer la matière non utilisée (non solidifiée) en fin de processus de fabrication. On parle, de ces cas-là, de poudres recyclées qui peuvent être proscrites pour certaines applications, puisqu'elles peuvent être partiellement altérées.

Il ne faut pas négliger les risques explosions associées à l'utilisation de matériaux pulvérulents. En effet, les poudres métalliques, tout comme les poussières de matières plastiques, forment avec l'air des atmosphères explosives.

Pour clore ce chapitre, il est important d'ajouter que le coût des poudres métalliques est actuellement environ 10 fois plus cher que les matériaux bruts. Les prix des poudres dépendent de la granulométrie et des matériaux. Ils varient de une à plusieurs centaines d'euros (316L (env. 30 e/Kg) – Inconel 718 (env. 80 e/Kg) – Titane TA6V (env. 320 e/Kg) 100 \$/kg pour de l'aluminium, 800 \$/kg pour du titane). Cependant, le coût matière passe toujours en second rang par rapport l'amortissement du moyen de production. Il semblerait également que certains constructeurs de moyen de FA ne permettent que l'utilisation de leurs poudres.

La Métallurgie

Lorsque l'on aborde la métallurgie de la FA, il est important de prendre en compte, tout au long de la l'opération de fabrication, le cyclage thermique suivi par la poudre mais également par le lit de poudre ou le substrat (avec et sans préchauffage) pour comprendre les structures métallurgiques que l'on obtiendra à la température ambiante à l'état détentionné.

Tout comme pour les moyens de fabrications conventionnelles, les propriétés mécaniques et bien entendu la tenue en fatigue d'une pièce vont dépendre :

- du type de matériau considéré,
- de la densité de la pièce obtenue,
- de la structure métallurgique.

On parle de solidification rapide et orientée, de la création d'un gradient thermique accompagné comme il se doit d'une zone affectée thermiquement, de transformation de phases, ...



JANVIER 2019

L'ensemble de ces phénomènes vont avoir un impact fort au niveau de la métallurgie du produit réalisé.

Les microstructures induites par ces nouveaux procédés sont donc dépendantes du type et de la taille des poudres, du type de procédé, de la puissance, de la vitesse de balayage, de la direction de construction mais également de l'architecture de la pièce à réaliser et des traitements de parachèvement,

La densité de la pièce produite est, comme nous l'avons déjà souligné, liée à la géométrie de la poudre utilisée, mais également à une bonne maîtrise des paramètres de fabrication (déjà cités). Il est important de maîtriser l'effet dit de refusion/réchauffage des dernières épaisseurs de couches déposées. Une tendance se dégage : que plus la couche déposée est fine, meilleure sera l'accroche avec la couche sous-jacente.

Au niveau de la structure, la FA forme habituellement, sur une vue transverse, des grains fins en raison de la vitesse de refroidissement élevée qui empêche ces derniers de croître. La structure sera donc d'autant plus fine que la source de chaleur est localisée, que la vitesse de balayage est grande et que les éléments de la pièce à construire seront peu épais.

Cependant, avec une coupe longitudinale, les grains sont allongés le long de la direction de construction. Cette croissance est directement reliée au gradient thermique entre la plateforme de construction et la surface du lit de poudre (par exemple dans le cas de procédés EBM ou SLM), lors que la « stratification métallurgique » est en marche. Cette anisotropie de la structure métallurgique entraîne une variation des caractéristiques mécaniques en fonction du sens de prélèvement de l'éprouvette de caractérisation.

Compte tenu des gradients thermiques induits pendant ce mode d'élaboration, la pièce est le siège de champs de contraintes importants. Une détente est systématiquement réalisée, le plus souvent au sein du procédé de FA pour réduire ces contraintes internes. Cette relaxation peut avoir un impact sur la structure métallurgique comme le montrent Song et son équipe sur du fer pur en montrant qu'un recuit à 650°C pendant 2,5h peut être à l'origine d'une recristallisation de la structure orientée brute de fabrication, bien que des vestiges d'une architecture colonnaire subsistent. Dans d'autres cas, ce traitement peut être à l'origine de précipitations de phases à partir d'une matrice métastable.

Dans le cas de procédé à poudre projetée, il est possible de réaliser des pièces à gradient de matière, (voir à gradient de porosité). Pour ce type d'orientation, il est nécessaire d'équiper le procédé de plusieurs réservoirs et de contrôler à chaque couche le pourcentage de chaque poudre injecté. Il faut cependant vérifier la compatibilité métallurgique des différents matériaux mixés. Ce saut technologique permettra à moyen long terme d'introduire des évolutions fonctionnelles à la surface du matériau sans introduire d'interfaces.

Une nouvelle approche dans la conception

Puisque la pièce est fabriquée strate par strate, il est possible de réaliser des formes qu'il était impossible de fabriquer par les méthodes traditionnelles de mise en forme ou d'usinage. Cette nouvelle approche révolutionnaire peut, pendant un certain temps, perturber les ingénieurs



JANVIER 2019

concepteurs qui ont toujours été formés à concevoir un produit en enlevant de la matière d'un bloc ou en le déformant. Face à ce changement technologique, de nouvelles réflexions en termes de conception sont en train d'émerger :

- Selon quelles orientations vais-je fabriquer mon produit ?
- Dois-je concevoir des supports pour maintenir mon produit en cours de FA ?
- De quelle manière vais-je m'y prendre pour séparer l'embase (le support) de la pièce fabriquée ? Comment vais-je brider mon ensemble et le semi-produit ?
- Comment puis-je anticiper les déformations sur le produit réalisé pendant l'opération de FA et pendant les étapes de traitement thermique ?
- Comment dois-je prendre en compte les post traitements (finition de surface, traitement thermique, revêtement de surface, ...) dans le design de mon produit réalisé en FA ?
- Quel est l'impact d'une géométrie complexe sur l'hétérogénéité microstructurale de ma matrice obtenue par FA ?

Attaché à l'applicatif, la 3ème partie de cette trilogie, que vous retrouverez dans la Newsletter N°27, mettre en lumière une application de fabrication additive qui commence à voir le jour dans le monde de la fonderie. On s'aperçoit bien que cette nouvelle façon de concevoir et fabriquer est en train de révolutionner un nombre conséquent de secteurs d'activités.

[SONG 2014] Bo Song, « Nouvelles voies de fabrication d'alliages métalliques à hautes performances à partir de poudres », thèse UTBM, juin 2014.

Nous remercions au passage Michael Young pour l'autorisation qu'il nous a procuré à utiliser les photos de ses œuvres dans les bandeaux.