

# Production et caractérisation d'échantillons en acier 316L par le procédé de fabrication additive arc-fils

C. HACQUARD<sup>a</sup>, F. DESCHAUX-BEAUME<sup>a</sup>, F. SOULIE<sup>a</sup>

<sup>a</sup> LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

christophe.hacquard@umontpellier.fr

frederic.deschaux-beaume@umontpellier.fr

fabien.soulie@umontpellier.fr

## Résumé :

*Ce travail a pour but d'améliorer la connaissance des relations entre les paramètres du procédé de fabrication additive arc-fils, le transfert de chaleur associé, et les microstructures produites. Le matériau étudié est l'acier inoxydable 316L, largement utilisé dans l'industrie pétrochimique ou marine. La technologie arc utilisée ici est la technologie CMT<sup>®</sup> (Cold Metal Transfer) développée par Fronius<sup>®</sup>, et dérivée du procédé MIG/MAG. Elle permet un contrôle précis de l'apport d'énergie et de matière. Utilisant un moyen de fabrication instrumenté, les effets de différents paramètres procédés sur les champs de température, la taille et la forme du bain liquide créé, et les microstructures générées, sont étudiés. Les conditions de solidification du matériau et les cycles thermiques subis au cours de la fabrication sont discutés au regard de leurs effets potentiels sur les microstructures formées.*

## Abstract :

*This work aims at improving the knowledge of the relations between the parameters of the WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) process, the associated heat transfer, and the microstructural characteristics of the produced samples. The retained material is a 316L stainless steel, extensively used in petrochemical or in marine engineering. The arc welding technology used in this study is the CMT (Cold Metal Transfer) technology developed by Fronius company, derived from the conventional MIG/MAG process. This technology allows a precise control of the heat input and the deposit of molten metal. Using an instrumented WAAM device, the effect of the various process parameters on the temperature fields, the deposit of molten metal and the microstructure, are investigated. The solidification conditions of the material and the subsequent thermal cycles are discussed with respect to their potential effect on the formed microstructures.*

**Mots clefs : fabrication additive, soudage, 316L, microstructure, métallurgie**

# 1 Introduction

Les procédés de fabrication additive ont été largement étudiés au cours des dernières décennies. Le principe de ces techniques consiste à déposer de la matière couche par couche en suivant une trajectoire définie, de manière à produire la forme désirée. Pour la fabrication de pièces métalliques de grandes dimensions, le procédé arc-fil (WAAM – wire arc additive manufacturing) dérivé des procédés de soudage, qui consiste à déposer du métal à l'état liquide à partir d'un fil métallique fondu par un arc électrique, présente plusieurs avantages, comme un faible coût d'investissement et la disponibilité des matières premières pour de très nombreux matériaux. Cependant, ce procédé présente aussi quelques inconvénients, comme la faible précision dimensionnelle des pièces produites, la présence de contraintes résiduelles, ou des microstructures généralement assez grossières, qui restent à améliorer pour permettre une utilisation extensive de ce procédé.

L'acier 316L est un acier inoxydable austénitique largement utilisé dans les industries chimiques, pétrolière, agroalimentaire ou encore dans le médical. Afin de limiter les risques de fissuration à chaud, les compositions de fils d'acier 316L développées pour le soudage possèdent des teneurs en éléments alphasuffisantes pour former une petite quantité de ferrite au sein d'une matrice austénitique [1]. La quantité de ferrite retenue est d'autant plus élevée que la vitesse de refroidissement est rapide après solidification. La morphologie de la ferrite présente est également gouvernée par le taux de refroidissement. Après un refroidissement lent, la ferrite adopte une morphologie vermiculaire, alors qu'à cinétique plus rapide, une forme lamellaire est observée [1][2]. La présence de cette phase ferritique peut favoriser l'apparition de phase sigma fragilisante lorsque le matériau est soumis à des températures comprises entre 500 et 900°C environ.

Les conditions de solidification sous forts gradients thermiques caractéristiques des procédés de fabrication additive par fusion produisent des morphologies de grains colonnaires orientés dans la direction de construction, c'est-à-dire perpendiculaires aux couches déposées. Avec les procédés à base de poudre [3][4], la structure colonnaire est fine du fait des très grandes vitesses de solidification, et peut laisser apparaître des zones de grains équiaxes en fonction des paramètres procédés [5]. Avec le procédé arc-fil, la taille du bain liquide est plus importante et la solidification plus lente, ce qui produit des structures de grains colonnaires plus grossières présentant des propriétés mécaniques pouvant être inférieures à celles de procédés classiques [6][7]. Une optimisation des paramètres procédé peut permettre, comme avec les procédés à base de poudre, d'affiner la microstructure obtenue, mais l'effet des paramètres du procédé arc-fils sur les caractéristiques microstructurales de l'acier 316L est à ce jour peu documenté.

Le travail présenté ici a pour but d'étudier l'impact des paramètres procédé sur la microstructure des dépôts de 316L produits par fabrication additive arc-fil.

## 2 Dispositif expérimental

L'installation de fabrication additive utilisée est composée d'un robot 6 axes Kuka® KRC4 équipé d'une torche de soudage MIG (Metal Inert Gas) alimentée par un poste de soudage CMT® (Cold Metal Transfert) développé par la société Fronius®. Ce procédé est une variante du procédé de soudage MIG et permet une plus grande maîtrise de l'énergie et du dépôt de matière grâce à un contrôle précis de la forme d'onde du courant de l'arc électrique, qui produit la fusion d'un fil-électrode métallique, et un mouvement alterné du fil d'apport, qui permet de venir déposer à la fréquence de 100 Hz environ des gouttelettes de métal fondu, sans produire de projections. Le procédé permet ainsi de réaliser des dépôts de métal très réguliers avec des taux de dépôt satisfaisants (de l'ordre de 3 Kg/h), ce qui

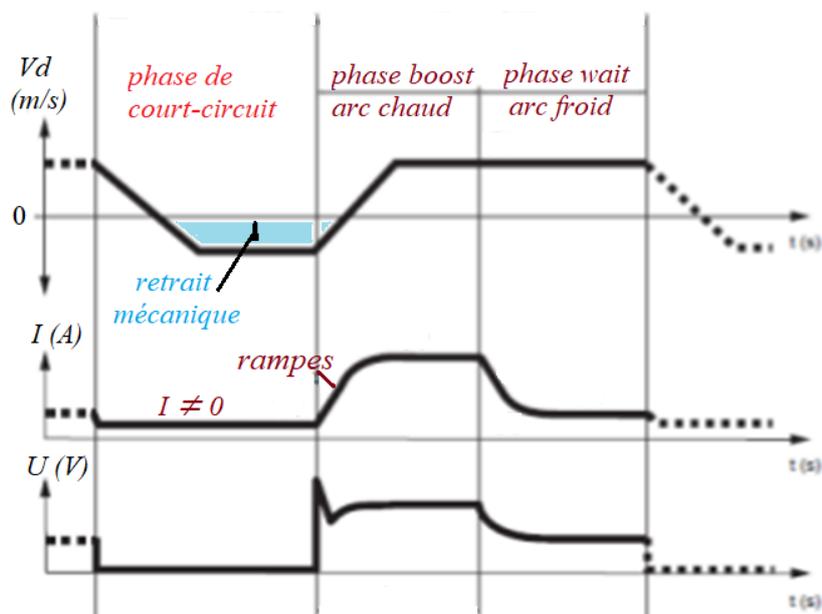
explique sa large utilisation en fabrication additive par procédé arc-fil [8][9][10]. Le fil-électrode utilisé est un fil d'acier 316L-Si de diamètre 1 mm (Tableau 1). Pour protéger le métal liquide de l'oxydation, un gaz à base d'argon contenant 2% en CO<sub>2</sub> est utilisé.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.01	0.92	1.6	0.025	0.011	18.3	2.6	12.0	0.1

**Tableau 1.** composition chimique (%) du fil d'acier 316L-Si

## 2.1 Paramètres du procédé

Afin de produire la fusion du fil et le dépôt régulier des gouttelettes de métal liquide formées à l'extrémité du fil-électrode, les paramètres contrôlant la forme d'onde du courant de l'arc électrique et le dévidage du fil doivent être ajustés de manière précise. Le processus de fusion et de dépôt de matière propre au procédé CMT est décrit sur la figure 1. Dans un premier temps, un arc électrique de forte intensité  $I_{boost}$  est créé à l'extrémité du fil pendant une courte durée  $t_{boost}$ , afin de produire une gouttelette de métal liquide (phase « d'arc chaud »). L'intensité de l'arc diminue ensuite jusqu'à une valeur  $I_{wait}$ , de manière à maintenir la gouttelette à l'extrémité du fil sans qu'elle se détache, et le fil est « dévidé » vers la pièce en construction à la vitesse imposée  $V_d$  (phase « d'attente »), de manière à déposer à sa surface la gouttelette de métal liquide, qui se solidifie ensuite. Au moment du contact du fil avec la pièce, un court-circuit s'établit et l'arc électrique s'éteint (phase de « court-circuit »). L'intensité prend alors la valeur réglée  $I_{cc}$ , qui doit permettre de maintenir par effet joule la température du fil pour que son extrémité reste liquide jusqu'au détachement de la gouttelette. Au moment où le court-circuit apparaît, le mouvement du fil d'apport s'inverse, produisant son retrait à une vitesse contrôlée par le paramètre  $V_d$ , jusqu'au détachement du fil et au réamorçage de l'arc électrique, qui retrouve l'intensité  $I_{boost}$ . La durée totale de ce cycle est de 10 à 15 ms selon les paramètres procédé. Nous avons retenu dans cette étude les paramètres proposés par Fronius dans la synergie CMT n°877 (Tableau 2).



**Figure 1.** Cycle de transfert de métal du procédé CMT

I_boost (A)	t_boost (s)	I_wait (A)	Vd (m/min)	I_sc (A) <i>court-circuit</i>
-------------	-------------	------------	------------	----------------------------------

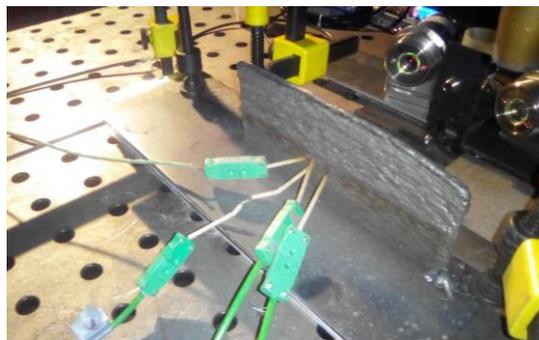
**Tableau 2.** paramètres principaux du procédé CMT

En plus des paramètres contrôlant l'arc électrique et le dépôt du fil, il faut également choisir les paramètres de trajectoire et de vitesse de déplacement de la torche, pilotés par le robot. Nous avons choisi dans notre cas des trajectoires très simples permettant la construction de murs de longueur 180 mm. Seuls sont à programmer les points de départ et d'arrivée de chaque couche, ainsi que la hauteur de translation de la torche entre deux couches, qui a été fixée à 2 mm en fonction des observations effectuées au cours d'essais préliminaires. La vitesse de déplacement a quant à elle été fixée à 300 mm/min. Enfin, il faut régler le temps d'attente entre deux couches, nécessaire pour permettre le refroidissement du dernier dépôt et éviter l'accumulation de chaleur dans les dernières couches déposées, qui pourrait conduire à la modification de la géométrie des dépôts, voire à leur effondrement. Le réglage de ce temps d'attente, dépendant des paramètres procédé du CMT et de la trajectoire parcourue à chaque couche, permet d'atteindre un régime thermique quasi-stationnaire dès la troisième ou quatrième couche déposée [10][11]. Il a été fixé à 15s pour nos essais.

## 2.2 Instrumentation du procédé

Afin de contrôler la régularité du cycle de dépôt de matière, les paramètres électriques tension et intensité sont enregistrés à la fréquence de 25 kHz via une carte d'acquisition NI<sup>®</sup> USB-9215 et le logiciel Labview<sup>®</sup>. L'intensité est mesurée à l'aide d'un capteur de courant à effet Hall LEM LF 305-S. La tension de l'arc électrique est déterminée en mesurant la différence de potentiel entre la plaque-support de construction en 316L et le « tube contact » guidant le fil-électrode à la sortie de la torche de soudage. Cette mesure est conditionnée à l'aide d'un pont diviseur pour être compatible avec la gamme de mesure de +/-10V de la carte d'acquisition.

L'évolution des températures au cours de la fabrication pouvant avoir une forte influence sur les microstructures formées, la température est mesurée à l'aide de thermocouples de type K soudés sur la surface de la plaque-support ou sur la surface des premières couches déposée d'un mur en construction (Figure 2).



**Figure 2.** Thermocouples soudés sur le mur au cours de la construction

En complément de ces mesures, des images vidéo du dépôt en cours de construction sont enregistrées à l'aide d'une caméra Mako G-030 Allied Vision, afin d'observer la taille et la stabilité des bains liquides formés lors des dépôts successifs.

### 3 Résultats

#### 3.1 Stabilité du dépôt de matière

Les enregistrements des courbes d'évolution des tension et intensité montrent une très grande régularité du cycle électrique (Figure 3), ce qui témoigne d'un transfert de gouttelettes stable qui doit produire un dépôt régulier. Ce résultat est confirmé par les images vidéo enregistrées, qui montrent que la taille du bain liquide produit par le dépôt à haute fréquence (près de 100 Hz) des gouttelettes de métal liquide demeure constante au cours de la fabrication, avec une longueur de 30 mm et une profondeur de 6 mm environ (Figure 4).

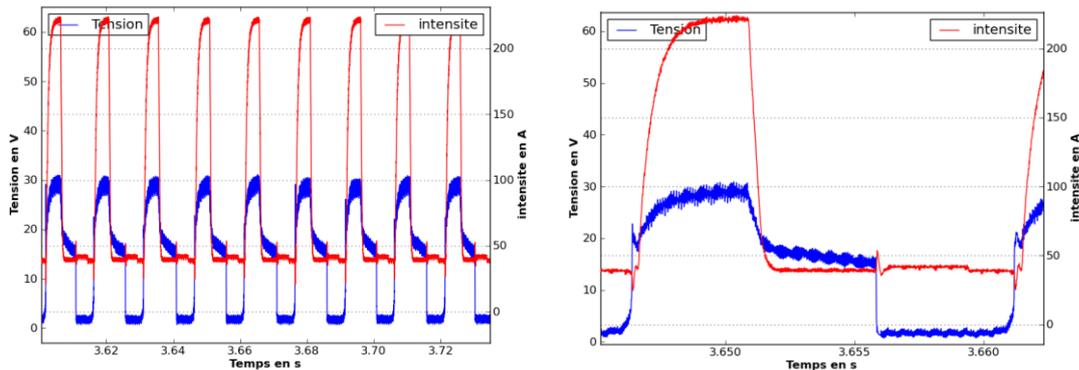


Figure 3. Evolution des tension et intensité lors des cycles CMT

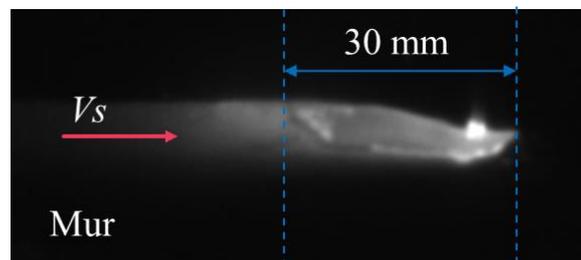


Figure 4. Bain liquide observé en cours de construction

#### 3.2 Evolution des températures

La figure 5 montre l'évolution des températures enregistrées à la surface d'une couche déposée lors du dépôt des couches suivantes. Le temps nécessaire au soudage des deux thermocouples, situés 5 mm environ sous la surface supérieure du mur déjà construit, produit le refroidissement quasi complet des couches déjà déposées, qui sont alors presque redescendues à la température ambiante lorsque la construction reprend. On constate sur la figure 5 que la température lors du dépôt suivant monte jusqu'à environ 700°C au niveau des thermocouples, qui sont pourtant situés à quelques millimètres seulement du métal en fusion déposé, ce qui démontre les très forts gradients thermiques produits par le procédé. Lors de la passe suivante, qui s'effectue après un temps de pause de 15 secondes, le métal est encore à 300°C lorsque la nouvelle passe est déposée, ce qui fait monter sa température encore jusqu'à 700°C environ, bien que l'on soit plus éloigné de la surface supérieure sur laquelle est déposée la nouvelle couche de métal liquide. On peut constater que la matière au niveau des thermocouples continue d'accumuler de la chaleur pendant encore 4 ou 5 couches déposées successives, alors qu'elle est de plus en plus éloignée de la zone de dépôt de matière liquide. C'est seulement après la septième

couche déposée que le métal commence à se refroidir, et après la dixième environ qu'il repasse au-dessous de 500°C, température au-dessous de laquelle la phase sigma ne peut plus se former. Ces résultats montrent que le métal ne reste que quelques minutes au-dessus de 500°C, ce qui semble insuffisant pour entraîner la formation de phase sigma fragilisante.

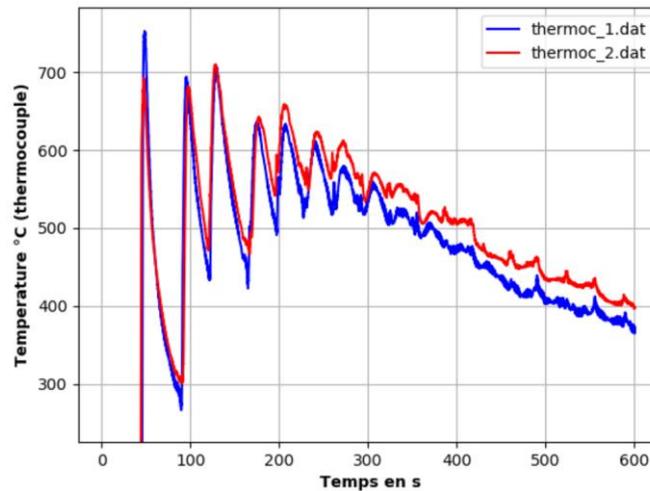


Figure 5. Evolution des températures mesurée lors de la construction d'un mur

### 3.3 Caractéristiques géométriques et microstructurales des murs

Les murs réalisés présentent des géométries différentes selon la stratégie de construction retenue (Figure 6). Lorsque tous les dépôts sont réalisés dans le même sens, on observe un excès de matière en début de cordon, et un manque de matière en fin de cordon. Ces défauts géométriques peuvent être fortement atténués en alternant le sens de dépôt à chaque nouvelle couche.

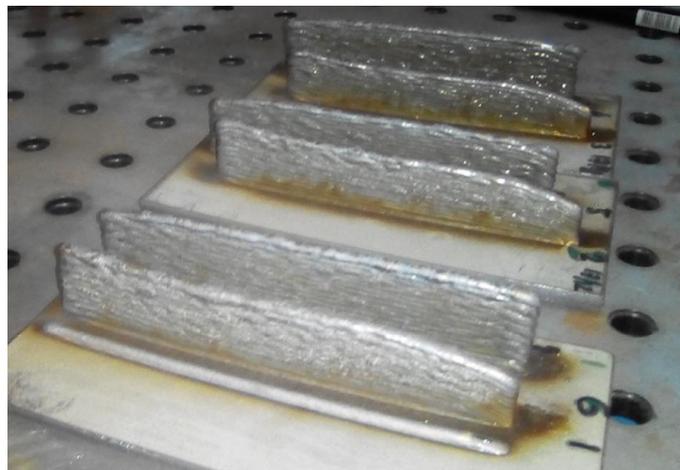


Figure 6. Géométrie des murs obtenus

Les coupes transversales au centre des murs fabriqués montrent que la largeur demeure assez régulière malgré l'empilement des couches déposées, avec toutefois des variations entre les valeurs minimales de 8mm et maximales de 11 mm environ (Figure 7).

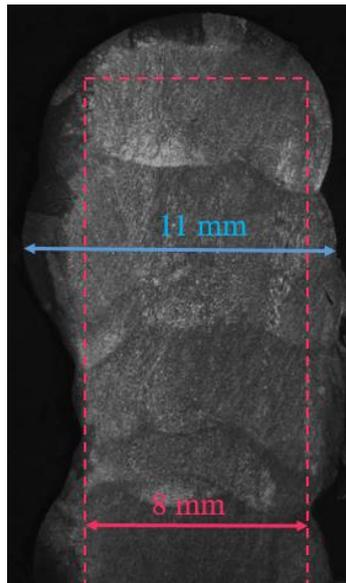


Figure 7. Coupe transversale d'un mur

Les observations micrographiques en microscopie optique des murs montrent que la microstructure formée est constituée en majorité d'austénite présentant un morphologie dendritique colonnaire orientée dans la direction de construction, et de ferrite vermiculaire dans les zones interdendritiques. Sur ces premiers essais, des différences existent entre les premières couches déposées et la dernière couche. Cependant elles sont faibles, avec ces paramètres, ce qui semble montrer qu'à cette échelle d'observation, les cycles thermiques produits par les passes successives ne modifient peu la microstructure.



Figure 8. Micrographie d'une coupe transversale de mur, partie basse (gauche) et dernière couche (droite)

## 4 Conclusion et perspectives

Les premiers essais réalisés sur l'installation de fabrication additive arc-fil ont permis de mettre en place l'instrumentation nécessaire à l'étude des relations entre les paramètres du procédé CMT, les conditions de solidification et de refroidissement, et les microstructures formées pour le fil d'acier 316L étudié. Des murs réguliers ont pu être construits avec les paramètres procédé retenus, grâce à l'obtention d'un régime thermique quasi-stationnaire dans les différentes couches déposées. Le temps passé au-dessus de 500°C est relativement court, ce qui laisse espérer l'absence de formation de phase sigma fragilisante, malgré la présence de ferrite vermiculaire observée sur la microstructure des murs fabriqués. Il reste toutefois à confirmer ce résultat avec des analyses plus fines en microscopie électronique à balayage et analyse EDS. Enfin, la suite de l'étude visera à sélectionner les paramètres

du procédé permettant d'obtenir des microstructure plus fines, afin de tenter d'améliorer les caractéristiques mécaniques des pièces fabriquées.

## Références

- [1] J. C. Lippold and V. F. Savage, "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments: Part III-The Effect of Solidification Behavior on Hot Cracking Susceptibility The formation of a low-melting eutectic and S and P segregation along fusion zone grain boundaries promotes the formation," *Weld. Res. Suppl.*, p. 388.
- [2] J. W. Fu, Y. S. Yang, and J. J. Guo, "Formation of a blocky ferrite in Fe-Cr-Ni alloy during directional solidification," *J. Cryst. Growth*, vol. 311, no. 14, pp. 3661–3666, 2009.
- [3] X. Li and W. Tan, "Numerical investigation of effects of nucleation mechanisms on grain structure in metal additive manufacturing," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 153, no. February, pp. 159–169, 2018.
- [4] F. Yan, W. Xiong, E. Faierson, F. Yan, W. Xiong, and E. J. Faierson, "Grain Structure Control of Additively Manufactured Metallic Materials," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, p. 1260, Nov. 2017.
- [5] G. P. Dinda, A. K. Dasgupta, and J. Mazumder, "Texture control during laser deposition of nickel-based superalloy," *Scr. Mater.*, vol. 67, no. 5, pp. 503–506, Sep. 2012.
- [6] J. V. Gordon, C. V. Haden, H. F. Nied, R. P. Vinci, and D. G. Harlow, "Fatigue crack growth anisotropy, texture and residual stress in austenitic steel made by wire and arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 724, pp. 431–438, May 2018.
- [7] L. Ji, J. Lu, C. Liu, C. Jing, H. Fan, and S. Ma, "Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing," *MATEC Web Conf.*, vol. 128, p. 03006, Oct. 2017.
- [8] P. M. S. Almeida and S. Williams, "Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)," 2010.
- [9] J. González, I. Rodríguez, J.-L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez, and A. Pereira, "Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 840–847, Jan. 2017.
- [10] A. G. ORTEGA, "Prototypage rapide de pièces en alliage d'aluminium : étude du dépôt de matière et d'énergie lors de la fusion à l'arc d'un fil par le procédé MIG-CMT," 2018.
- [11] B. Zheng, Y. Zhou, J. E. Smugeresky, J. M. Schoenung, and E. J. Lavernia, "Thermal Behavior and Microstructural Evolution during Laser Deposition with Laser-Engineered Net Shaping: Part I. Numerical Calculations," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. VOLUME 39A, p. 2228.
- [12] M. R. P. C. Stewart W. Williams Filomeno Martina, "Residual Stress Reduction in High Pressure Interpass Rolled Wire+Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components," 2014.