

Prédiction de la hauteur d'un mur mono-cordon fabriqué en *Directed Energy Deposition* – Laser Poudre

C. Leroy-Dubief¹, F. Poulhaon¹, P. Joyot¹

¹ Univ. De Bordeaux, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, F-64210 Bidart, France {c.leroydubief,f.poulhaon,p.joyot}@estia.fr

Résumé — Le procédé DED – LP met en jeu des phénomènes physiques complexes qui nécessitent d'être modélisés afin de mieux les comprendre. Le modèle présenté associe une approche semi-analytique et une simulation thermique stationnaire. Il prédit, dans un premier temps, les dimensions d'un cordon déposé. Une extension de ce modèle permet ensuite de calculer la hauteur totale d'un mur fin. Une validation expérimentale, effectuée sur une machine BeAM® est finalement comparée au modèle.

Mots clefs — DED – LP, formulation semi-analytique, simulation eulérienne.

1. Introduction

La fabrication additive révolutionne la façon dont les pièces métalliques sont conçues et fabriquées. Le procédé *Directed Energy Deposition* – Laser Poudre (DED – LP), encore appelé *Laser Metal Deposition* – poudre (LMD – P), permet des applications telles que le rechargement, la production de pièces et l'ajout de fonctions. À l'origine, la technologie de projection de poudre n'était utilisée que pour le rechargement, ce qui explique l'abondante littérature sur le sujet [11]. Les progrès technologiques ont permis d'utiliser un jet de poudre coaxial au laser (et non plus, un jet latéral), ce qui a conduit au développement du procédé DED – LP permettant de fabriquer des pièces de grand volume [10]. Il en résulte une histoire et des phénomènes thermiques complexes dus à la multiplication des couches déposées.

Dans ce contexte, il est rapidement devenu indispensable de simuler le procédé afin de prédire l'histoire thermique subie par le matériau [1] et la géométrie des cordons fabriqués. Ainsi, un des principaux enjeux consiste à estimer la largeur et la hauteur d'un dépôt en fonction des paramètres « primaires » utilisés (puissance laser, débit de poudre et vitesse de déplacement). De nombreuses règles empiriques ont d'abord émergé avant qu'une approche sous forme de modèles analytiques et/ou numériques ne soit développée. La majorité des modèles analytiques sont basés sur un découplage entre le flux thermique apporté par le faisceau laser et le flux de poudre. Cependant, ils ne prennent pas en compte le fait que la poudre qui impacte le bain de fusion a tendance à le refroidir, ce qui conduit la plupart du temps à une surestimation de la taille du bain de fusion [4]. Dans [10], Pinkerton confronte modèle analytique et simulation numérique afin de prédire la dilution et la largeur d'un cordon. Les deux modèles sont ensuite soumis à une validation expérimentale ; la méthode numérique a tendance à surestimer la taille du cordon alors que l'approche analytique la sous-estime. La solution la plus précise réside peut-être dans une méthode combinant numérique et analytique telle que celle de Peyre [7]. C'est également l'axe de recherche du travail présenté ici.

Pour ce faire, un modèle semi-analytique inspiré des travaux présentés dans [9] a été développé. Il fournit la température de préchauffage de la poudre ainsi que la puissance laser atténuée impactant le substrat. Ces éléments servent ensuite de données d'entrée pour une simulation thermique eulérienne qui estime la largeur et la hauteur d'un cordon. Le modèle est alors étendu à une succession de couches

afin de déterminer la hauteur totale d'un mur. Les résultats de cette simulation sont enfin comparés aux données expérimentales réalisées sur une machine BeAM®.

2. Stratégie de modélisation

2.1. Approche générale

L'objectif premier du modèle présenté est d'estimer les dimensions de cordons déposés en DED – LP avec des jeux de paramètres différents (puissance du laser, vitesse de déplacement et débit de poudre). L'approche générale utilisée dans le modèle peut être décomposée en trois étapes (Figure 1).

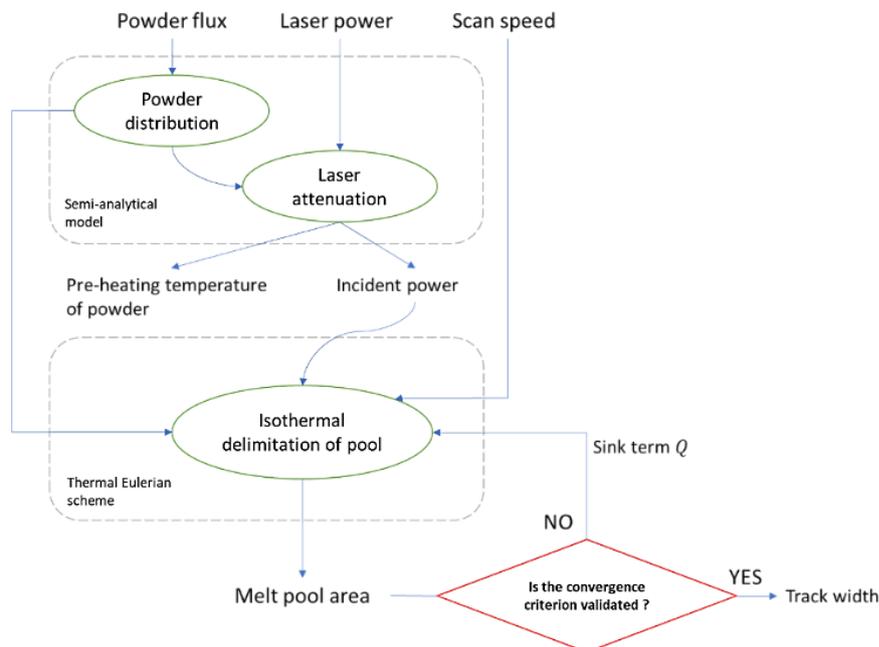


Figure 1 – Aperçu de la méthode développée combinant une formulation semi-analytique et un modèle thermique

L'étape initiale consiste à calculer la puissance incidente, c'est-à-dire la part de puissance laser qui impacte effectivement le substrat, en tenant compte des pertes induites par l'acheminement du faisceau laser via sa fibre ainsi que la puissance absorbée et réfléchiée par la poudre projetée. Au cours de cette étape, l'élévation de la température des particules au cours de leur vol vers le bain de fusion est également estimée.

La puissance atténuée est ensuite utilisée comme entrée dans un modèle thermique employant la méthode des éléments finis. Une première estimation des dimensions du bain de fusion peut alors être effectuée. Néanmoins, la largeur estimée ne peut être considérée comme équivalente à la largeur du cordon créé, car la poudre tombant dans la zone fondue, plus froide, a tendance à absorber de la chaleur, ce qui a pour effet de réduire la taille du bain de fusion. Il est donc nécessaire de tenir compte de la quantité de matière capturée par le bain et de sa température lorsqu'elle atteint le bain : ces éléments sont calculés grâce au modèle semi-analytique déjà évoqué.

Dans la troisième étape, un terme puit de chaleur quantifiant l'énergie requise pour faire fondre la poudre entrant dans le bain, est ajouté ; ce qui conduit à une nouvelle itération pour déterminer les

dimensions actualisées du bain. Quelques itérations sont nécessaires pour obtenir une stabilisation de la largeur du bain, qui résulte d'un compromis entre le maintien du bain en fusion et l'ajout de matière froide. Cette dimension est alors considérée comme étant la largeur du cordon. Sa section transversale est alors estimée en considérant le débit de poudre et la vitesse de déplacement. L'aire et la largeur sont finalement employées pour calculer la hauteur du cordon, en faisant l'hypothèse d'une forme semi-circulaire.

2.2. Distribution de poudre et modèle d'atténuation du laser

La technologie DED – LP consiste à projeter de la matière métallique, sous forme de particules de poudre, qui est mise en fusion grâce à un faisceau laser. Cela mène à la formation d'un bain de matière liquide, qui se déplace, couche par couche dans l'espace, formant ainsi la pièce.

La machine BeAM® MAGIC 800 possède une buse dont la sortie de poudre est continue sur 360°. Le faisceau laser est coaxial au jet de poudre et défocalisé, le point focal étant au-dessus du substrat comme le montre la Figure 2. Un gaz primaire (argon) protège les lentilles optiques et se déverse par le même orifice que le laser ; un deuxième gaz porteur permet de transporter la poudre, lui donnant ainsi une vitesse initiale en sortie de buse. La particularité de cette machine réside dans l'apport d'un troisième gaz qui s'ajoute au premier et sert à façonner le jet de poudre.

Les hypothèses utilisées ici sont les suivantes :

- L'écoulement est quasi-statique dans le modèle semi-analytique tandis que la vitesse de dépôt est prise en compte dans le modèle thermique eulérien. La vitesse des particules est supposée être constante bien que le gaz qui forme le jet tend à accélérer les particules. Les effets de la gravité et de la traînée sont négligés ([8,5]).
- Les particules de poudre sont considérées sphériques et de rayon constant, comme supposé par Diniz Neto [3] ; cela tend à être une hypothèse raisonnable pour la poudre produite par atomisation au gaz [9].
- Les interactions entre les particules telles que les collisions ou les effets d'ombre sont négligées [6], tout comme les pertes de puissance dues aux secondes réflexions [2].
- Pour des raisons de simplicité, le faisceau laser est considéré comme cylindrique de rayon constant, malgré le fait qu'il soit défocalisé (*cf.* Fig. 2) ; sa distribution d'intensité est considérée comme uniforme (*cf.* Figure 4 dans [9]).

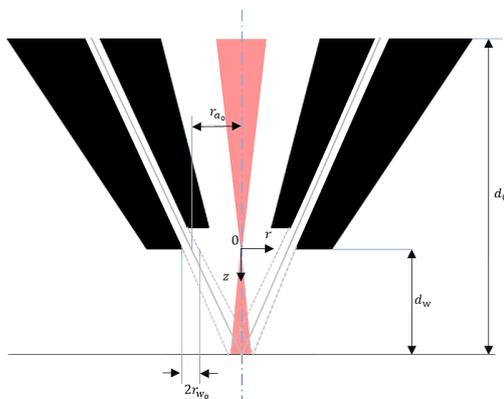


Figure 1 – Schéma de la buse BeAM®

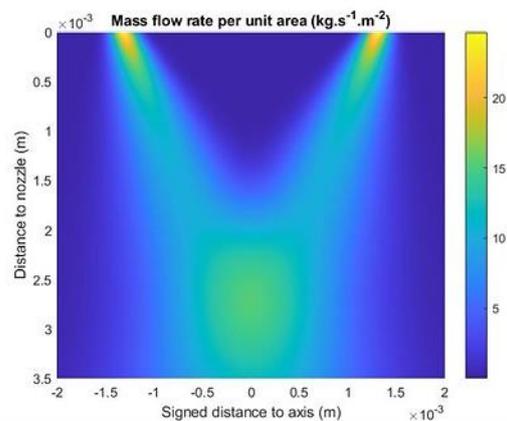


Figure 2 – Représentation de la répartition des particules au sein du jet de poudre

Commençons par écrire les rayons r_a et r_w qui définissent, respectivement le rayon moyen et la demi-largeur de la couronne du jet de poudre à une altitude z :

$$r_a(z) = \frac{d_w - z}{d_w} r_{a_0} \text{ et } r_w(z) = \left(\frac{z}{d_0 - d_w} + 1 \right) r_{w_0} \quad (1) \text{ et } (2)$$

Comme la plupart des auteurs le suggèrent (*e.g.* [8,5,3,9]), la distribution des particules (5) au sein du jet de poudre peut être représentée par une fonction gaussienne de type TEM_{01}^* (*cf.* Figure 3.11 dans [11]). Pour ce faire, deux composantes C_1 (3) et C_2 (4), sont calculées, toutes deux d'unité homogène à une surface :

$$C_1(z) = \pi r_w^2 e^{-2 \left(\frac{r_a(z)}{r_w(z)} \right)^2} \text{ et } C_2(z) = \pi r_w(z) r_a(z) \sqrt{2\pi} \operatorname{erf} \left(\sqrt{2} \frac{r_a(z)}{r_w(z)} \right) \quad (3) \text{ et } (4)$$

Le débit massique de poudre par unité de surface est alors donné par la relation suivante (représentée sur la Figure 3) :

$$D_r(r, z) = \frac{F}{C_1(z) + C_2(z)} \left[e^{-2 \left(\frac{r - r_a(z)}{r_w(z)} \right)^2} + e^{-2 \left(\frac{r + r_a(z)}{r_w(z)} \right)^2} \right] \quad (5)$$

L'intensité du laser est considérée comme uniforme sur toute la section en coupe du faisceau. La loi de Beer-Lambert exprime l'intensité du faisceau à une distance z depuis la sortie de la buse [9]:

$$I_r(z) = \frac{P_0}{\pi L^2} \exp \left(- \frac{3}{4 v_z r_p \rho} \int_0^z D_r(z) dz \right) \quad (6)$$

où v_z est la composante de vitesse des particules de poudre sur z .

En intégrant l'intensité $I_r(z = d_w)$ sur l'entière section du faisceau laser, nous obtenons la puissance incidente P_i qui impacte le bain de fusion :

$$P_i = 2\pi \int_0^L r I_r(z = d_w) dr \quad (7)$$

Dans le but de prédire la température à laquelle les particules sont chauffées avant d'atterrir dans la zone fondue, il est nécessaire d'exprimer leur trajectoire en utilisant leurs coordonnées (Z, R) . Pour des raisons de simplicité, des trajectoires linéaires sont ici considérées, bien que les différents gaz jouent un rôle dans la déviation des particules. La température des particules qui tombent dans le bain, *i.e.* celles dont les coordonnées sont $Z = d_w$ et $0 < R < L$, est finalement donnée par cette relation :

$$T_{preheating}(R) = T_0 + \frac{3\alpha}{4\rho c_p r_p} \left[\frac{1}{2v'_z} \int_{z'(L)}^{d_w} I(z, r'(z)) dz + \frac{1}{2v''_z} \int_{z''(L)}^{d_w} I(z, r''(z)) dz \right] \quad (8)$$

Où (v'_z, r', z') et (v''_z, r'', z'') sont la vitesse, le rayon et l'altitude des particules venant respectivement d'un côté et de l'autre du jet de poudre.

La durée durant laquelle les particules passent à travers le faisceau laser n'est pas suffisant pour atteindre leur température de fusion ; c'est pourquoi une portion de la puissance incidente est allouée à la fusion de cette masse ajoutée plus froide. Cela mène à introduire dans le modèle thermique un terme « puit de chaleur » imitant ce phénomène. Ce terme correctif prend la forme d'un flux appliqué dans la zone d'impact de la poudre, et de signe opposé au flux de chaleur apporté par le laser.

2.3. Modèle thermique en régime stationnaire

La puissance incidente notée P_i permet la définition d'une source équivalente dans la simulation thermique (effectuée avec le solveur commercial Morfeo®). Dans le modèle eulérien employé, la source de chaleur est fixe et une section de matériau, initialement à température ambiante, se déplace à vitesse constante. Une solution stationnaire est ainsi obtenue pour un coût de calcul moindre (Figure 3). En outre, un raffinement du maillage, localisé dans la zone de chauffe, garantit une plus grande précision dans l'apport de chaleur.

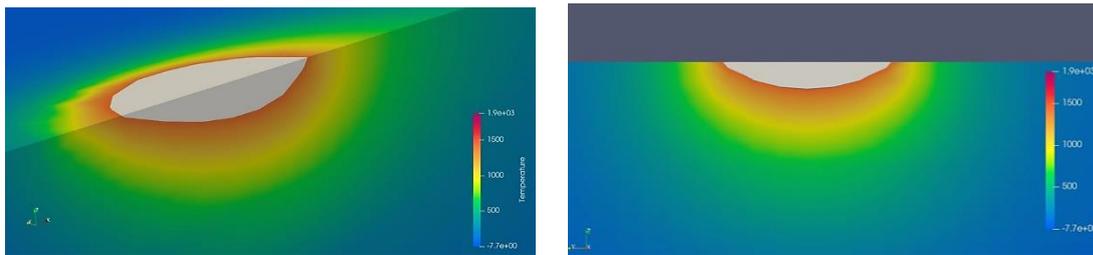


Figure 3 – Champ thermique obtenu par simulation eulérienne (le bain de fusion apparaît grisé)

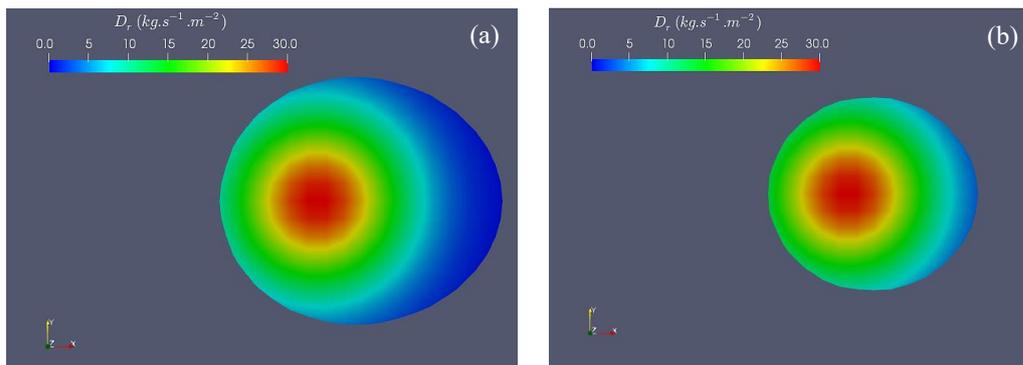


Figure 4 – Répartition de la poudre sur la surface du bain de fusion : 1ère itération (a) et dernière itération (b)

Ce modèle prend en compte la variation des propriétés matériau (conductivité thermique, chaleur spécifique et densité) avec la température. De plus, il considère les pertes de chaleur par convection et radiation. Une première itération permet d'estimer grossièrement les dimensions de la zone fondue. La quantité de poudre capturée par le bain peut être déterminée et le terme correctif est alors calculé. Les itérations successives consistent à ajuster le terme correctif jusqu'à ce que la largeur du bain se stabilise (Figure 4). Cette largeur est alors considérée comme représentative de la largeur du cordon.

2.4. Extension du modèle aux murs fins

Le modèle est maintenant appliqué à un mur fin *i.e.* un mur formé d'un seul cordon par couche (Figure 6.a). La hauteur de chaque couche composant le mur est estimée successivement. Dans un premier temps, la quantité de poudre, capturée et fondue, est calculée en fonction de la distribution de poudre, de la distance de travail et de la taille du bain, comme exposé dans la section précédente. La section transverse du cordon, notée S_b , est estimée à partir du ratio entre le débit volumique de poudre capturée et la vitesse de déplacement. En plus de S_b , une zone refondue de la couche précédente, notée S_r , vient s'ajouter. Cette dernière est évaluée en considérant un rapport fixe pour la profondeur de refusion (h_r) sur la hauteur de la couche (h_i) (Figure 6.b). La section totale S_t est définie comme la somme de S_b et S_r .

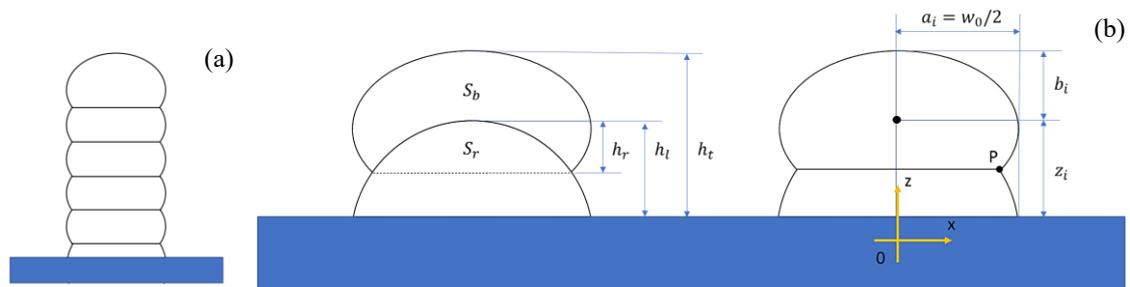


Figure 6 – Modèle de mur fin basé sur un ratio fixe de profondeur de refusion et des hypothèses de forme elliptique

La section totale S_t est supposée elliptique (sauf pour la première couche supposée semi-circulaire), avec une largeur (grand-axe) égale à la largeur du premier cordon (w_0). La coordonnée z du centre de l'ellipse (notée z_i pour la couche i) ainsi que le demi-petit axe (noté b_i pour la couche i) sont obtenus en résolvant un système d'équations tenant compte de l'ellipticité et du ratio de profondeur de dilution/refusion.

3. Validation expérimentale

Le matériau adopté pour l'expérience est une poudre d'acier inoxydable MetcoClad® 316L-Si (fourni par Oerlikon). La configuration petite buse (10 Vx) de la machine BeAM® est utilisée, les paramètres choisis sont indiqués en Table 1. Le substrat en 316L a une épaisseur de 3 mm sans traitement de surface particulier.

Table 1 – Jeux de paramètres machine appliqués

N° essai	Puissance laser (W)	Puissance incidente* (W)	Vitesse de déplacement ($m s^{-1}$)	Débit de poudre ($g min^{-1}$)
1	360	235	1000	2.9
2	360	235	2000	2.9
3	660	567	1000	2.9

* Les valeurs données tiennent compte des pertes dans la fibre optique et de l'atténuation du faisceau par la poudre.

3.1. Prédiction des dimensions d'un cordon

Pour chaque jeu de paramètre indiqué en Table 1, 5 itérations du modèle présenté précédemment sont nécessaires pour obtenir un bain de fusion stabilisé. Pour chaque jeu de paramètres, l'essai a été répété à trois reprises et des dimensions moyennes ont été calculées. Les résultats sont présentés dans la Table 2.

Table 2 – Résultats simulés et expérimentaux

N° essai	Largeur de cordon (μm)			Hauteur de cordon (μm)		
	Expérience	Modèle	Erreur (%)	Expérience	Modèle	Erreur* (%)
1	643	638	-0.78	63	64	1.59
2	537	536	-0.19	45	28	-37.8
3	935	956	2.25	197	92	-53.3

* Le modèle a été recalé sur l'essai n°1 afin de ne pas cumuler cette erreur lors de l'estimation de la hauteur du mur fin.

3.2. Prédiction de la hauteur d'un mur fin

La paramétrie choisie pour la fabrication du mur est celle de l'essai n°1. 20 couches sont déposées. Le modèle estime la hauteur totale à 1.49 mm alors que le mur fabriqué (Figure 7) a une hauteur de 2 mm soit une sous-estimation de l'ordre de 25%.



Figure 7 – Photo d'un mur en inox 316L-Si fabriqué par DED – LP

4. Discussion et conclusion

Une approche itérative utilisant un terme puit de chaleur est adoptée avec succès pour obtenir un bain de fusion stabilisé dans un temps de calcul relativement court (moins de 5 min). La comparaison des résultats expérimentaux et simulés donne une approximation cohérente. Bien que la prédiction de la largeur des cordons soit précise, l'estimation de la hauteur reste confrontée à une incertitude quant à la forme du jet. L'extension du modèle au mur fin met en lumière une interdépendance entre la distance de travail et la hauteur de couche créée. Ces deux paramètres évoluent de façon dynamique lors de l'empilement successif des couches, ce qui conduit à des phénomènes stabilisants ou au contraire, divergents.

Références

- [1] M. Alimardani, E. Toyserkani, J.P. Huissoon, Three-dimensional numerical approach for geometrical prediction of multilayer laser solid freeform fabrication process, *Journal of Laser Applications*. 19 (2006) 14–25.
- [2] W. Devesse, D. De Baere, P. Guillaume, Modeling of laser beam and powder flow interaction in laser cladding using ray-tracing, *Journal of Laser Applications*. 27 (2015) S29208.

- [3] O.O. Diniz Neto, R. Vilar, Physical–computational model to describe the interaction between a laser beam and a powder jet in laser surface processing, *Journal of Laser Applications*. 14 (2002) 46–51.
- [4] L. Han, J. Choi, Two Dimensional Modeling of Laser Cladding With Droplet Injection, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2008: pp. 183–188.
- [5] Y.-L. Huang, G.-Y. Liang, J.-Y. Su, J.-G. Li, Interaction between laser beam and powder stream in the process of laser cladding with powder feeding, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 13 (2005) 47–56.
- [6] J. Liu, L. Li, Y. Zhang, X. Xie, Attenuation of laser power of a focused Gaussian beam during interaction between a laser and powder in coaxial laser cladding, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 (2005) 1546–1550.
- [7] P. Peyre, P. Aubry, R. Fabbro, R. Neveu, A. Longuet, Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (2008) 025403.
- [8] A.J. Pinkerton, L. Li, An analytical model of energy distribution in laser direct metal deposition, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 218 (2004) 363–374.
- [9] A.J. Pinkerton, An analytical model of beam attenuation and powder heating during coaxial laser direct metal deposition, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (2007) 7323–7334.
- [10] A.J. Pinkerton, Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance, in: *Advances in Laser Materials Processing*, Elsevier, 2010: pp. 461–491.
- [11] E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin, *Laser Cladding*, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, 2004.