



HAL
open science

Recouvrement acier par technologie CMT : Réalisation et propriétés mécaniques

Pascal Robert, Matthieu Museau, Henri Paris, Alexis van Wesemael, Xavier
Gostiaux

► **To cite this version:**

Pascal Robert, Matthieu Museau, Henri Paris, Alexis van Wesemael, Xavier Gostiaux. Recouvrement acier par technologie CMT : Réalisation et propriétés mécaniques. 16ème Colloque National S.mart, Apr 2019, Les Karellis, France. hal-03192506

HAL Id: hal-03192506

<https://hal.science/hal-03192506>

Submitted on 8 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Recouvrement acier par technologie CMT : Réalisation et propriétés mécaniques

Pascal Robert

Univ. Grenoble Alpes, CNRS,
G-SCOP, 38000 Grenoble
Grenoble – France
Pascal.robert@grenoble-inp.fr

Matthieu Museau

Univ. Grenoble Alpes, CNRS,
G-SCOP, 38000 Grenoble
Grenoble – France

Henri Paris

Univ. Grenoble Alpes, CNRS,
G-SCOP, 38000 Grenoble
Grenoble – France

Alexis Van Wesemael

Vallourec Research Center France
59620 Aulnoye-Aymeries
Aulnoye-Aymeries – France

Xavier Gostiaux

Vallourec Research Center France
59620 Aulnoye-Aymeries
Aulnoye-Aymeries – France

Résumé - Le recouvrement est une technique qui permet de renforcer la surface d'une pièce par l'ajout de matière. L'essor de la fabrication additive arc-fil permet d'étudier plus en profondeur le recouvrement de surface avec de nouvelles technologies. Dans ce papier, le processus de recouvrement de quart de viroles par un acier G3Si1 sur 10 mm d'épaisseur à l'aide de la technologie CMT est décrit. Dans un premier temps les paramètres sont déterminés à l'aide d'une campagne expérimentale. Le processus de recouvrement est ensuite décrit et trois trajectoires de déposes, radiale, longitudinale et alternée sont réalisées. Ce processus est amélioré au fur et à mesure des déposes et de l'expérience acquise afin de réduire les arrêts durant la dépose et le manque de recouvrement sur les viroles. Enfin les propriétés mécaniques des revêtements réalisés sont inspectées. Des éprouvettes cylindriques sont prélevées et soumises à des tests de tractions. Les résultats obtenus montrent que la virole ayant la trajectoire de dépose longitudinale présente une résistance élastique et une résistance à la rupture supérieure aux autres. Celle dont la trajectoire a été réalisée de manière alternée présente la surface extérieure la plus lisse mais présente les moins bonnes propriétés mécaniques.

Mots Clés - CMT, Acier, Recouvrement, , Essais de traction Norme 6892-1

I. INTRODUCTION

La fabrication additive métallique connaît un essor important depuis 20 ans. Le Wohlers Report 2013 estime que son marché global atteindra les 10 milliards de dollars en 2021 [1].

Parmi les technologies additives permettant la fabrication de pièces métalliques on distinguera celle utilisant un matériau de base sous forme de fil métallique et un arc électrique comme source d'énergie. Celles-ci se regroupent sous la dénomination « WAAM » pour Wire & Arc Additive Manufacturing.

Ces procédés proviennent historiquement du détournement de la soudure à l'arc au profit de la fabrication additive.

Ils se distinguent ainsi par leur faible coût de mise en œuvre, leur forte productivité (2.6kg/h contre 0.36kg/h pour des

procédés poudre [2]) et leur capacité à produire des pièces de grande taille. De plus la fabrication additive par fil a un impact environnement plus faible que celles par poudre [3].

De nombreuses technologies de soudure existent et peuvent être utilisées pour la fabrication additive. On trouve les procédés MIG MAG, TIG, plasma ou CMT par exemple.

Le procédé CMT Fronius a été particulièrement investigué dans le domaine de la fabrication additive. Sa capacité à produire un cordon de soudure régulier, avec peu d'apport d'énergie et quasi aucune projection font de cette technologie de soudure un candidat idéal pour la fabrication additive [4].

Outre la fabrication de pièces, les applications WAAM permettent l'ajout d'épaisseur ou de fonctionnalité sur des pièces préalablement existantes.

L'ajout d'une couche localisée permet de renforcer une pièce en lui apportant des caractéristiques géométriques et mécaniques différentes. Le but peut être de renforcer la dureté de la surface extérieure d'une pièce, la protéger contre l'oxydation ou simplement dans un but dimensionnel.

Ces applications se distinguent de la réalisation de mur fins. Les cordons sont ici déposés les uns à côté des autres. La distance optimale entre deux cordons pour produire un recouvrement optimal et une surface supérieure la plus plane possible est un paramètre important investigué par de nombreux auteurs.

En fonction de la représentation donnée aux cordons (sinusoïdale, parabolique, semi-circulaire) et du modèle de recouvrement choisi (« Flat Top » ou « Tangent ») la distance recommandée varie. Ainsi, Cao et al [5] recommandent de prendre une représentation semi circulaire et une distance de $0,64 w$ pour un modèle de recouvrement « flat top », w étant la largeur d'un cordon de soudure. Ding et al [6], recommandent de prendre pour une représentation parabolique et un modèle de recouvrement « tangent » une distance de $0,738 w$ entre deux cordons.

Cong et al [7], avancent qu'un apport d'énergie réduit diminue les porosités au sein de la soudure et trouve que le

CMT Advanced donne de meilleurs résultats en termes de porosités que le CMT Pulse (deux variations autour du CMT) lors de la réalisation de bloc en aluminium.

Tapiola a réalisé sa thèse de master [8] sur le recouvrement par des alliages de Cobalts, comme le Stellite, avec la technologie CMT. Il trouve que le CMT est une technologie adéquate pour produire des revêtements à faible taux de dilutions.

Pickin [9] étudie le recouvrement par des alliages d'aluminium et en comparant le CMT avec la soudure MIG pulsé arrive à la même conclusion que Tapiola : Le CMT permet de produire des revêtements à faible taux de dilutions : jusqu'à 10% pour de l'aluminium et jusqu'à 5% pour de l'acier.

Imoudou [10] montre que de nombreux travaux ont été entrepris sur l'application de la technologie CMT au recouvrement avec des alliages de cobalts, d'aluminium ou d'inconel cependant il ne souligne aucuns travaux sur la réalisation de revêtement avec de l'acier à l'aide de la technologie CMT.

Les travaux de Youheng[11] sur la réalisation de recouvrement en aciers de type bainite par la technologie de soudure DCRP « direct current reverse polarity pulse model » sont à souligner. Par une optimisation multicritère il optimise notamment le rapport largeur profondeur du cordon de soudure pour avoir un état de surface optimal.

Enfin on notera les travaux sur les propriétés mécaniques de murs fins en acier et inox produits par la technologie WAAM menée par Liberini [12] et Haden [13].

Ce papier présente la réalisation de surépaisseurs en acier sur des quarts de viroles avec la technologie CMT Advanced. Dans un premier temps les tests permettant la sélection des paramètres propices au recouvrement sont présentés. Ensuite le processus de réalisation des couches est décrit. Enfin les propriétés mécaniques des éprouvettes extraites de ces couches sont discutées.

II. RECHERCHE DE PARAMETRES

Il a été décidé de réaliser la couche avec une loi CMT Advanced. Les travaux de Cong [7] surlignent que cette variation du CMT est préférable pour diminuer le taux de porosité. Cependant ces travaux portent sur de l'aluminium. De plus la maîtrise de l'apport d'énergie permet de diminuer les contraintes internes résiduelles lors de la fabrication. Ce mode permet également de réduire le taux de projection par rapport au mode CMT originel.

La soudure CMT impose un mouvement d'avance et de recul du fil qui permet de faciliter le transfert de matière lors de la soudure et ainsi de réduire l'énergie dépensée lors de la phase d'arc. Un cycle CMT est présenté figure 1. La variation CMT Advanced est un mode de soudure dans lequel le courant change de polarité sur certains cycles d'avance et de recul du fil.

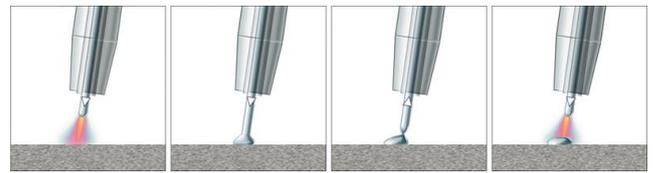


Figure 1. LE CYCLE CMT

Les expériences sont réalisées à l'aide d'un Robot Yaskawa DX200 présenté Figure 2. Le poste de soudure est un TPS 4000 CMT Advanced de Fronius. Le fil utilisé fait 1.2mm de diamètre, il s'agit de l'Aristorod 12,50 de ESAB. Sa composition est présentée Figure 3. Il s'agit d'un fil G3Si1 suivant la norme européenne, ER70S-6 pour la norme américaine. Toutes les soudures sont réalisées sous protection gazeuse. Le gaz utilisé est l'ArcalForce de Air Liquide composée de 82% d'Argon et de 18% de CO₂.

	C	0.07%
	Si	0.92%
	Mn	1.50%
	P	0.016%
	S	0.013%
	Cr	0.04%
	Ni	0.02%
	Mo	< 0.01%
	Cu	0.05%
	V	< 0.01%
Al	0.001%	
Ti+Zr	0.01%	
TENSILE		
ReL	Rm	A4-A5
470 MPa	560 MPa	26 %
IMPACT		
Temp	-30 °C	-40 °C
KV	100 J	90 J

Figure 2. INSTALLATION ROBOT YASKAWA SOUDURE CMT

Figure 3. COMPOSITION CHIMIQUE ET CARACTERISTIQUE MECANIQUE DU FIL G3Si1

Les premières expériences sont réalisées sur des plaques d'acier S235 de dimensions 250*250*5mm. La composition de cet acier est présentée Figure 4.

Grade	C%	Mn%	P%	S%	Si%
S235	0.22 max	1.60 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max

Figure 4. COMPOSITION S235

Des cordons simples ont donc tout d'abord été réalisés pour choisir deux sets de paramètres. Des blocs de 10 cordons de larges sur 5 d'épaisseurs ont ensuite été fabriqués. Ils ont ensuite été coupés, et leur section a été inspectée. Le but était de vérifier le bon recouvrement des cordons dans la section par l'absence de cavités internes.

La loi CMT Advanced n'existant pas pour du fil acier G3Si1 de 1,2mm nous avons utilisé la loi équivalente

disponible pour du fil de 1,0mm. Une des conséquences directes était l'écart important entre la vitesse de fil paramétrée et la vitesse de fil réelle. Pour une vitesse de fil paramétrée à 8m/min, la vitesse de fil réelle obtenue est en moyenne de 4,7 m/min (sur 10 cordons). Finalement, nous avons retenu deux sets de paramètres pour la réalisation de blocs préliminaires. L'une présente un apport d'énergie peu important et un cordon peu large et haut, l'autre a un apport d'énergie plus important mais présente un cordon plus large et moins haut. Ces paramètres sont présentés Table 1.

N° Loi CMT	1370	Débit de gaz (L/min)	13
Type de Loi	CMT Advanced	Angle entre la torche et la tangente à la surface-de dépose (°)	90
Vitesse de fil paramétrée (m/min)	8		
Vitesse de fil réelle (m/min)	4,7	Vitesse de torche (TS) (mm/min)	500
Stick Out (Distance torche substrat) (mm)	10	Incrément du robot entre deux couches (mm)	2

Tableau 1. PARAMETRES COMMUNS LORS DE LA REALISATION DES BLOCS

	Bloc1	Bloc 2
Balance	-5 (18 cycles à polarité inversée pour 1 classique)	0 (3 cycles à polarité inversée pour 3 classiques)
Distance intercordon (mm)	3,05	3,6
Tension U (V)	13.0	14.4
Intensité I (A)	118.5	143.5
Apport d'énergie (J/mm) (U*I*0.9/TS)	166	223

Tableau 2. PARAMETRES DIFFERENTS LORS DE LA REALISATION DES BLOCS

Les blocs réalisés font 10 cordons de large pour 5 cordons de hauteur, ce qui correspond au nombre de couches nécessaires pour dépasser 10mm de hauteur, qui est l'épaisseur à déposer sur les quart de viroles, et sont présentés figure 5.

On peut voir la présence de cavité dans le bloc réalisé avec le premier set de paramètre (à gauche). Les cordons sont trop hauts et ont du mal à être recouverts. Ces cavités se situent à gauche du bloc, donc sur les derniers cordons déposés pendant une couche. Au contraire le bloc réalisé avec les paramètres apportant plus d'énergie ne montre pas de manque de recouvrement à l'œil. De plus, la surface supérieure est bien plus plane. C'est donc ce set de paramètres qui a été choisi pour poursuivre le recouvrement des viroles.



Figure 5. BLOCS 5*10 EP/EN=-5 (GAUCHE) ET EP/EN=0 (DROITE)

III. PROCESSUS DE DEPOSE

Le but est donc de réaliser une couche de 10mm d'épaisseur sur 200mm de long sur des quarts de virole avec les paramètres sélectionnés. Les quarts de virole en question sont en acier X65 dont la composition est présentée figure 6. Les quart de viroles font 250mm de long pour 25mm d'épaisseur et ont un diamètre nominal externe de 406,4mm.

Matériel	Min. Limite D'élasticité	Min. Résistance à la Traction	Élongation	C	Si	Mn	P	S
	Mpa	Mpa						
American Standard API 5L								
X65	450	535	19	0.26	0.40	1.45	0.03	0.03

Figure 6. COMPOSITION X65

A partir des paramètres sélectionnés trois types de trajectoires différentes ont été générées. Ces trajectoires sont présentées dans le tableau 3. La première trajectoire est une trajectoire longitudinale (ou axiale). Le sens de dépose des cordons est indiqué par les flèches pleines. L'ordre de dépose des cordons est indiqué par la flèche en pointillé.

Longitudinale	
Radiale	
Alternée	Couche 1&5
	Couche 2
	Couche 3
	Couche 4

Tableau 3. TRAJECTOIRES DE DEPOSE

Les couches ne pouvaient être déposées directement sur les quart de viroles, en effet la couche d'oxydation présente

empêchait l'arc de démarrer. La Figure 7 illustre l'état de surface d'origine des quarts de viroles. La surface des quarts de viroles a donc été nettoyée à l'aide d'une ponceuse orbitale afin d'enlever cette couche d'oxydation. Le résultat est montré Figure 8.



Figure 7. QUART DE VIROLE SANS PREPARATION



Figure 8. QUART DE VIROLE NETTOYÉE A LA PONCEUSE ORBITALE

Au cours de la fabrication de la première virole, il est arrivé que l'arc ait du mal à redémarrer. Cela était dû aux projections provenant de la soudure qui s'accumulaient dans la buse et venait gêner le bon dévidage du fil et l'apparition de l'arc électrique. Un nettoyage automatique et un graissage de la buse entre chaque couche a donc été rajouté durant la dépose radiale et alternée. Les quarts de viroles obtenues après dépose des surcouches sont observables sur les figures 9, 10 et 11.



Figure 9. DEPOSE LONGITUDINALE

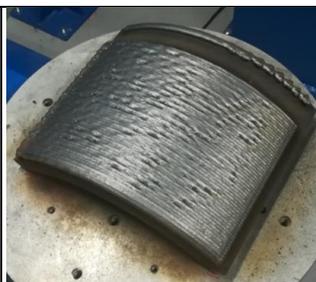


Figure 10. DEPOSE RADIALE



Figure 11. DEPOSE ALTERNEE

On peut observer l'apparition de creux dans les déposes réalisées. Ces renforcements sont inexistantes sur les premières couches et deviennent de plus en plus nombreux au fur et à mesure que l'on progresse dans les couches. Nous supposons que ces manques de recouvrement sont dus au mauvais

dévidage du fil provoqué en parti par l'encrassement de la buse mais surtout provoqué par le contrôleur du poste de soudure qui n'arrive pas à assurer un dévidage constant du fait que la loi utilisée ne soit pas adaptée au diamètre du fil. Cela rends donc la vitesse de fil irrégulière et produit donc un cordon inférieur aux dimensions espérées. Le cordon étant momentanément plus fin que celui espéré, cela provoque un manque de recouvrement sur le cordon précédent, la distance entre deux cordons ayant été paramétrée pour un cordon plus large. L'instauration du nettoyage de buse entre chaque couche aurait dû améliorer l'état de surface obtenu. Cependant cela est apparu insuffisant. ; Il a donc été décidé de resserrer les galets de torche pour la dépose alternée et de rallonger le temps de nettoyage de buse entre chaque couche. Cela a porté ses fruits car les défauts observés sont bien moins nombreux sur la dernière virole.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Des éprouvettes cylindriques de traction (norme ASTM) de 4mm de diamètre pour 16 mm de long ont été prélevées sur chaque virole perpendiculairement à l'axe et leur tenue mécanique a été évaluée par des tests de traction, voir figure 14 et 15. La limite élastique moyenne à la traction sur l'ensemble des éprouvettes est mesurée à 416 MPa ce qui correspond à une perte de 11% par rapport aux propriétés du fil d'apport, estimées à 470MPa. Ces résultats semblent encourageant par rapport aux essais conduits par Haden et al [13]. Les éprouvettes prélevées sur les quarts de viroles dont le revêtement a été réalisé longitudinalement présentent la meilleure résistance élastique en moyenne (μL) et celle déposée de manière alternée présentent la plus faible (μA), voir figure 12.

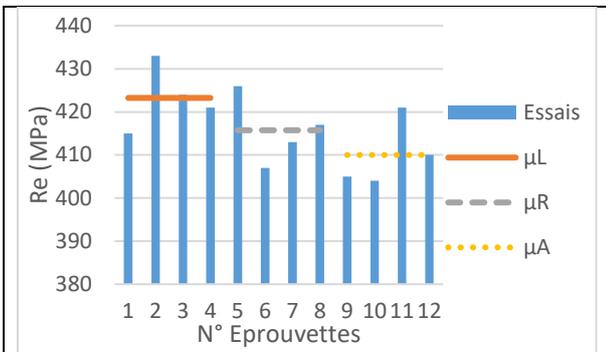


Figure 12. COMPARAISON DES RESISTANCES ELASTIQUES

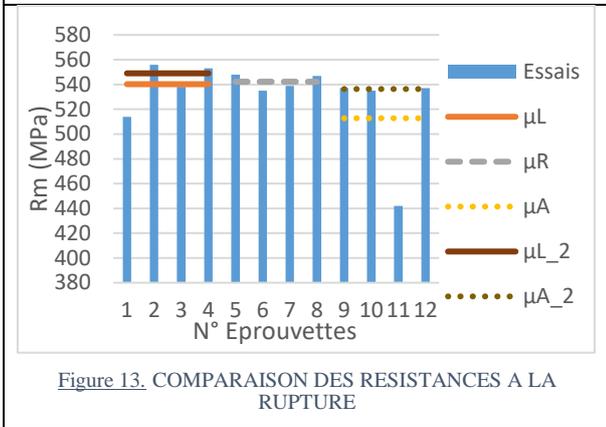


Figure 13. COMPARAISON DES RESISTANCES A LA RUPTURE

Si on regarde la résistance à la rupture, la moyenne globale est à 532MPa ce qui correspond cette fois ci à une perte de l'ordre de 5% seulement par rapport aux données constructeur (estimées à 560MPa). Les quarts de viroles dont le revêtement a été déposé de manière radiale et longitudinale ont des résistances à la rupture comparable. Les éprouvettes 1 et 11 ont cédé prématurément comme le montre les figures 14 et 15. Cette rupture est due à la présence de porosités macroscopiques dans les éprouvettes. Si elles ne sont pas prises en compte, la résistance à la rupture moyenne est de 542MPa. Les éprouvettes prélevées sur le premier quart de virole ont alors une résistance à la rupture moyenne (μ_{L_2}) de 549MPa. Celles prélevées sur le dernier quart de virole ont alors une résistance à la rupture moyenne (μ_{A_2}) de 536MPa, donc toujours plus faible que les autres éprouvettes mais du même ordre de grandeur.

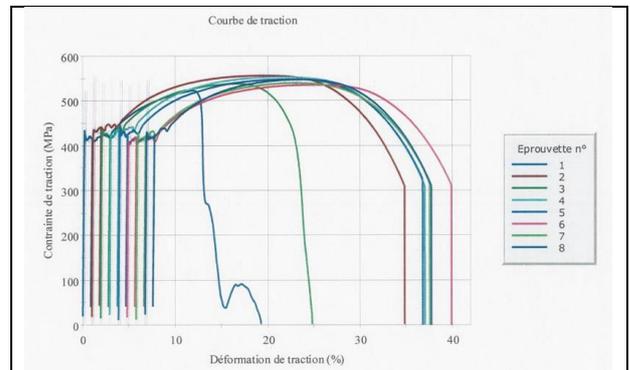


Figure 14. COURBES DE TRACTION TEST TRANSVERSAL (DEPOSE LONGITUDINALE, 1-4, ET RADIALE, 5-8)

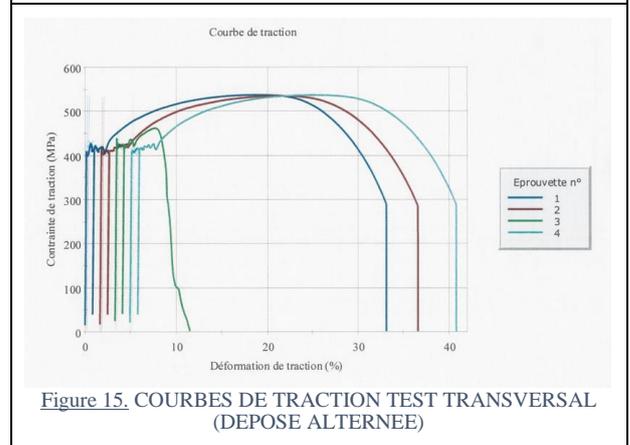


Figure 15. COURBES DE TRACTION TEST TRANSVERSAL (DEPOSE ALTERNEE)

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous devons réaliser le recouvrement de quart de viroles d'acier X65. Nous avons réalisé sur trois quarts de viroles une surcouche d'acier avec une soudure CMT Advanced. Pour chaque quart de viroles nous avons testés une trajectoire de dépose différente. Des éprouvettes ont ensuite été prélevées afin d'évaluer les propriétés mécaniques des revêtements réalisés.

VI. REMERCIEMENTS

Les auteurs aimeraient remercier ces différents intervenants sans qui les recherches réalisées n'auraient pas pu se faire :

Merci tout d'abord, à l'entreprise Vallourec qui a financée, proposée le cas d'étude et s'est occupée de l'analyse mécanique des éprouvettes de traction.

Merci également à la région Auvergne Rhône-Alpes, à la structure S-MART anciennement AIP Primeca et à Grenoble INP pour leur soutien et leur financement.

VII. REFERENCES

[1] TERRY, W. (2013). Wohlers Report 2013. Wohlers Associates Inc, 60.

[2] CAMPOCASSO, S., & MUSEAU, M. (2017). *Fabrication additive par dépôt direct multi-axes* (Doctoral dissertation, CNRS-Réseau des mécaniciens).

[3] PARIS ET AL., « Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2016, 65/1 :29-32

[4] www.fronius.com/fr-fr/france/techniques-de-soudage/competences/process-de-soudage/cmt

[5] CAO Y, ZHU S, LIANG X, WANG W. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process. *Robot Comput-Integr Manuf* 2011;27:641–5.

[6] DING, DONGHONG, ZENGXI PAN, DOMINIC CUIURI, ET HUIJUN LI. « A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 31 (1 février 2015): 101-10.

[7] CONG, BAOQIANG, RUIJIE OUYANG, BOJIN QI, ET JIALUO DING. « Influence of Cold Metal Transfer Process and Its Heat Input on Weld Bead Geometry and Porosity of Aluminum-Copper Alloy Welds ». *Rare Metal Materials and Engineering* 45, n° 3 (1 mars 2016): 606-11.

[8] TAPIOLA, JAAKKO. « Cold Metal Transfer Cladding of Wear and Corrosion Resistant Coatings in Engine Applications », 8 février 2017.

[9] PICKIN, C. G., S. W. WILLIAMS, ET M. LUNT. « Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding ». *Journal of Materials Processing Technology* 211, n° 3 (1 mars 2011):

[10] IMOUDU, AYELE, ET BARABADI, « The characteristic of cold metal transfer (CMT) and its application for cladding ». In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1883-87, 2017?

[11] YOUHENG ET AL., « Optimization of Surface Appearance for Wire and Arc Additive Manufacturing of Bainite Steel ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91, n° 1-4 (1 juillet 2017): 301-13

[12] LIBERINI ET AL., « Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing ». *Procedia CIRP*, 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16. [Edited by: Roberto Teti, Manager Editor: Dorian M. D'Addona], 62 (1 janvier 2017): 470-74.

[13] HADEN ET AL., « Wire and arc additive manufactured steel ». *Additive Manufacturing* 16 (1 août 2017): 115-23