

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Ferhat Abbas- Sétif 1

Institut : Optique et Mécanique de Précision

Département de mécanique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Optique et Mécanique de Précision

Spécialité : Mécanique des matériaux

Mémoire de Master

Caractérisation microstructurale et mécanique d'une couronne élaborée par fabrication additive

Etudié par : Boukebal hadjer

**Dirigé Par : Pr. Kamel loucif
Dr. Abdeslem Kahlouche**

Devant le jury :

H. Osmani	Président
S. Tebbane	Examineur

Soutenue le : 04/07/2023

Résumé

Un nouveau procédé de fabrication additive pour les pièces métalliques, basé sur le procédé de soudage à l'arc appelé CMT (Cold Metal Transfert), est étudié dans l'objectif de réalisations des couronnes qui formé par la superposition d'un grand nombre des cordons en alliage d'aluminium Al-5Mg et son caractérisation mécanique et microstructurale. Le procédé CMT permet de contrôler la fusion d'un fil d'aluminium et son dépôt sous la forme des couches sur la surface de tôle substrat. Plusieurs défauts géométriques ont été observés, et les conditions de leur apparition analysées, grâce notamment à l'utilisation d'un microscope optique. La compréhension des relations entre paramètres procédé, mécanismes de transfert de chaleur et de matière, et géométrie des couronnes, a permis de corriger ces défauts en identifiant puis modifiant les paramètres procédé responsables de leur apparition. Enfin, une étude comparative entre une pièce réalisée par la fabrication additive et l'autre réalisée par le tour conventionnel.

Mots clé : fabrication additive, CMT (cold metal transfert), les couronnes, fil métallique, arc électrique, caractérisation mécanique et microstructurale.

Absract

A new additive manufacturing process for metal parts, based on the arc welding process called CMT (Cold Metal Transfer), is being studied with the aim of realising crowns that are formed by the superposition of many of the Al-5Mg aluminum alloy layers and its mechanical and microstructural characterization. The CMT process makes it possible to control the melting of aluminum wire and its deposition in the form of layers on the surface of the substrate sheet. Several geometric defects were observed, and the conditions of their appearance analyzed, thanks in particular to the use of an optical microscope. Understanding the relationships between process parameters, heat and material transfer mechanisms, and crown geometry, has made it possible to correct these defects by identifying and then modifying the process parameters responsible for their appearance.

Keywords: additive manufacturing, CMT (cold metal transfer), crowns, metal wire, Electric arc, mechanical and microstructural characterization.

Sommaire

Remerciements.....	1
Dédicace	2
Résumé	3
Introduction générale.....	1

Chapitre I: fabrication additive et application

Introduction.....	4
I.1 Fabrication additive.....	4
I.1.1 Généralités.....	4
I.1.2 Définitions	5
I.1.3 Méthodologie générale de fabrication additive (FA).....	5
I.1.4 Catégories de procédés.....	6
I.1.5 Matériaux	6
I.1.6 Enjeux économiques	7
I.1.7 Domaines d'applications	8
I.2 La fabrication additive des pièces métalliques	9
I.2.1 Classification des procédés de fabrication additive de pièces métallique.....	9
I.2.2 Technologies basées sur la fusion par arc électrique	11
I.3 Technologie WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing)	12
I.3.1 définition	12
I.3.2 Développements récents du procédé WAAM	12
I.3.3 l'arc électrique	12
I.4 Différents types de technologies de soudage à l'arc utilisées en WAAM	13
I.4.1 Procédé TIG (Tungsten Inert Gas).....	13
I.4.2 Procédé Plasma	13
I.4.3 Procédé MIG (Metal Inert Gas).....	14
I.4.4 Procédé CMT (Cold Metal Transfert).....	14
I.4.4.1 Description du cycle CMT	15

Chapitre II: alliage d'aluminium (Al-Mg5)

II.1 Introduction	18
II.2 Alliages d'aluminium.....	18
II.2.1 l'aluminium	18
II.2.2 Propriétés physiques	18
II.3 Désignation des alliages d'aluminium	19
II.4 Aluminium et ses alliages.....	20

II.4.1 Classification des alliages d'aluminium	20
II.4.1.1 Alliages à durcissement structural (alliages trempant)	20
II.4.1.2 Alliages sans durcissement structural (alliages non trempant)	21
II.5 Alliage Aluminium-Magnésium (Al-Mg5Cr (A))	22
II.5.1 Alliages Aluminium-Magnésium	22
II.5.2.2 Effet spécifique du magnésium (Mg)	22
II.5.3 Applications de l'aluminium et ses alliages :	23
II.6 Conclusion.....	23

Chapitre III: Moyens expérimentaux

III.1 Introduction	26
III.2 Matériau et échantillons.....	26
III.2.1 Matériau	26
III.2.2 Élaboration des échantillons	26
III.3 Caractérisation mécanique	27
III.3.1 Traction.....	27
III.3.2 Essais de dureté.....	28
III.4 Caractérisation microstructurale.....	29

Chapitre VI: Résultats et interprétations

IV.1 Introduction.....	33
IV.2 Description des échantillons	33
IV.3 Caractérisation mécanique	36
IV.3.1 Mesure de dureté.....	36
IV.3.2 l'essai de compression.....	37
VI.3.3 Essai brésilien	39
VI.4 Caractérisation microstructurale	42
CONCLUSION GENERALE.....	45
Références bibliographiques.....	46

Liste des figures:

Chapitre I : fabrication additive et applications

Figure I. 1: Chaîne numérique de la fabrication additive [3].	6
Figure I. 2: Part de marché de la fabrication directe dans le monde et prévisions [11].	8
Figure I. 3: Principe de procédé TIG.	13
Figure I. 4: principe de procédé Plasma.	14
Figure I. 5: schéma représente le procédé MIG.	14
Figure I. 6: Description du cycle CMT [21].	16
Figure I. 7: Représentation d'un cycle de dépôt de CMT [28].	16

Chapitre II : Alliage d'aluminium (Al-Mg5)

Figure II. 1: Diagramme d'équilibre : Alliages Aluminium – Magnésium.	23
Figure II. 2: Applications des alliages d'aluminium.	23

Chapitre III : Moyens expérimentaux

Figure III. 1: le matériau utilisé dans la technique de CMT.	26
Figure III. 2: Exécution de la couronne par CMT.	27
Figure III. 3: Machine de traction.	28
Figure III. 4: Duromètre Qness 30M.	29
Figure III. 5: Microscope métallographique.	29
Figure III. 6: Enrobeuse de type Struers CitoPress-15.	30
Figure III. 7: polisseuse de la marque MECATECH Z34.	30

Chapitre VI : Résultats et Interprétations

Figure IV. 1: Photos des couronnes brutes d'élaboration.....	33
Figure IV. 2: Couronne brute d'élaboration, hauteur 20mm.	34
Figure IV. 3: Variation de l'épaisseur de paroi en fonction de la hauteur de couronne.	35
Figure IV. 4: Variation de l'épaisseur de paroi en fonction de la hauteur normée de couronne.....	35
Figure IV. 5: Variation de la dureté en fonction de la hauteur vraie des différentes couronnes.	37
Figure IV. 6: Variation de la dureté en fonction de la hauteur vraie des différentes couronnes.	37
Figure IV. 7: Courbes de compression.	38
Figure IV. 8: Courbe de compression d'une couronne usinée à partir d'un lingot AU4G.....	39
Figure IV. 9: Courbes force déformation en traction indirecte.....	40
Figure IV. 10: Courbe de traction indirecte d'une couronne usinée à partir d'un lingot AU4G.	41
Figure IV. 11: Formes des couronnes sous différents états.....	42
Figure IV. 12: Observation métallographiques des couronnes.....	44

Liste des tableaux :

Chapitre I : fabrication additive et applications

Tableau I. 1: Les sept catégories de fabrication additive [7].....	6
Tableau I. 2: les différentes catégories de procédés de fabrication additive et les types de matériaux associés [9].....	7
Tableau I. 3: Classification des procédés de fabrication additive de pièces métalliques selon l'ASTM [19].	10
Tableau I. 4: Procédés de FA de pièces métalliques par fusion localisée classés en fonction de la source de fusion employée [6].....	11

Chapitre II : Alliage d'aluminium (Al-Mg5)

Tableau II. 1: Propriétés physiques de l'aluminium à température ambiante [34].	19
Tableau II. 2: Principales séries d'alliages d'aluminium.	20

Chapitre VI : Résultats et Interprétations

Tableau IV. 1: Variation de l'épaisseur de la couronne en fonction de la hauteur pour différentes hauteurs.	34
Tableau IV. 2: Variation de la dureté en fonction de la hauteur des couronnes.....	36
Tableau IV. 3: Données des essais de compression pour les trois couronnes.	39

Liste des abréviations :

3D	trois dimensions
AM	Additive Manufacturing
FAAF	Fabrication Additive Arc-Fil
ASTM	American Society for Testing Materials
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
STL	Stereolithography
WAAM	Wire-arc additive manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
LENS	Laser Engineering Net Shaping
DED	Direct Energy Deposition
CMB	Controlled Metal Buildup
EBM	Electron Beam Melting
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
PAW	Plasma Arc Welding
TS	vitesse de la torche
WFS	vitesse d'alimentation du fil

Introduction générale

En tant que solution technique importante pour la production de pièces complexes, la fabrication additive de pièces métalliques a fait l'objet d'une grande attention ces dernières années. Parmi les différents procédés de fabrication additive métallique, nous avons choisi la fabrication additive par fil d'arc (FAAF) utilisant le soudage CMT (cold metal transfer) pour notre étude en raison de son taux de dépôt élevé, de son faible coût d'équipement et de sa faible perte de matière. Il a été constaté dans la littérature que l'un des problèmes les plus importants entravant l'application industrielle du procédé FAAF est la mauvaise précision géométrique des pièces fabriquées en raison de l'instabilité du procédé et du manque de commandes de contrôle de procédé fiables, Violations dans le processus de dépôt[1].

Le procédé permet désormais de fabriquer des pièces métalliques qui sont ou seront bientôt utilisées dans les secteurs médical, aéronautique et énergétique. Les techniques de fabrication additive par arc fil sont toutes basées sur la fusion créée par un arc électrique de fil, qui est ensuite déposé sous forme liquide sur la surface du substrat, où il se solidifie pour former une « cordon ». La superposition des cordons ou l'empilement des couches permettent de fabriquer les pièces. Ces techniques sont directement dérivées du procédé de soudage à l'arc, utilisant le même type de source de courant et de "tête" ou de "torche" pour alimenter le fil, fondre le métal et le déposer. Par conséquent, une variété de procédés de soudage à l'arc ont fait l'objet d'applications de fabrication additive pour des pièces métalliques. Les techniques basées sur la création d'un arc électrique entre une électrode réfractaire (non fondante) et la surface de la pièce, telles que les techniques plasma ou TIG (tungstène gaz inerte), sont les plus précises, car les métaux sont généralement régulés à l'état liquide. Par conséquent, une variété de procédés de soudage à l'arc ont fait l'objet d'applications de fabrication additive pour des pièces métalliques. Les techniques basées sur la création d'un arc électrique entre une électrode réfractaire (non fondante) et la surface de la pièce, telles que les techniques plasma ou TIG (tungstène gaz inerte), sont les plus précises, car les métaux sont généralement régulés à l'état liquide. L'objectif du travail de recherche présenté dans ce mémoire est la caractérisation mécanique et microstructurale de couronnes, de différentes hauteurs, élaborées par fabrication additive en utilisant la technique CMT[2].

Introduction générale

L'organisation du mémoire sera comme suit :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique des principes et techniques de la fabrication additive en particulier les développements récents concernant les procédés basés sur les technologies arc-fil métallique.
- Le second chapitre présente une revue bibliographique sur l'alliage d'aluminium (Al-Mg5).
- Le troisième chapitre décrit les dispositifs expérimentaux développés et/ou utilisés pour l'élaboration des couronnes et la caractérisation mécanique et microstructurale. Le banc de fabrication additive, spécialement conçu pour cette étude, est d'abord présenté, puis les caractéristiques du procédé de soudage CMT, qui a été intégré sur ce banc de fabrication pour assurer l'apport de fil métallique. Sa fusion contrôlée et son dépôt sont détaillées.
- Le quatrième chapitre décrit les résultats et l'interprétation de chacun ; d'élaboration, des essais mécaniques de caractérisation, les micrographies de caractérisation microstructurale.

La conclusion générale sera présentée à la fin du mémoire.