

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique**

Université Ferhat Abbas- Sétif 1

Institut : Optique et Mécanique de Précision

Département : Optique et mécanique de précision

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Optique et Mécanique de Précision

Spécialité : Mécanique des Matériaux

Mémoire de Master

Caractérisation des pièces en aciers inoxydables réalisées par la technique de fabrication additive

Étudié par : Farrouk BENSALÉM

Dirigé Par : Pr. Kamel LOUCIF

Dr. Mohamed HAMIDOUCHE

Devant le jury :

(Président) : Dr. Imane LAMIRI

(Examineur): Dr. Oumessaad GRIDI

Soutenue le : 04 / 07 /2023

ملخص:

التصنيع الإضافي هو بديل تكنولوجي حديث يؤدي إلى تصنيع الأجزاء عن طريق الطباعة. إحدى التقنيات المستخدمة هي (نقل المعادن الباردة) والتي تعتمد على بناء جزء بواسطة قطرات مذابة ومودعة على الفور على دعامة. الهدف من عملنا هو التوصيف الهندسي والميكانيكي والبنوي الدقيق لجدار من الفولاذ المقاوم للصدأ من أجل التحكم في شروط ومعاملات الإسقاط. استخدمنا تقنيات توصيف مختلفة: القياسات الميكرومترية، والصلابة، والشد، والفحص المجهرى. لقد أظهرنا أن خصائص الجدران تعتمد بشدة على تيار CMT وسرعة إزاحة الشعلة.

Abstract:

Additive manufacturing is a recent technological alternative that leads to the manufacture of parts by three-dimensional printing. One of the techniques used is CMT (Cold Metal Transfer) which is based on the construction of a part by droplets melted and instantly deposited on a support. The objective of our work is the geometric, mechanical and microstructural characterization of a stainless steel wall in order to control the projection parameters by CMT. We used different characterization techniques: micrometric measurements, hardness, traction and microscopy. We have shown that the characteristics of the walls strongly depend on the CMT current and the torch displacement speed.

Résumé :

La fabrication additive est une alternative technologique récente qui conduit à la fabrication de pièces par impression trois dimensions. L'une des techniques utilisées est la CMT (Cold Metal Transfert) qui est basé sur la construction d'une pièce par gouttelettes fondues et instantanément déposées sur un support. L'objectif de notre travail est la caractérisation géométrique, mécanique et microstructurale d'un mur en acier inoxydable en vue de maîtriser les paramètres de projection par CMT. Nous avons utilisées différentes techniques de caractérisation : mesures micrométriques, dureté, traction et microscopie. Nous avons montré que les caractéristiques des murs dépendent fortement du courant CMT et la vitesse de déplacement de la torche.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Principe de la Technologie Additive

I.1 Fabrication additive	3
I.1.1 Définition	3
I.1.2 Principe	3
I.1.3 Etapes principales du procédé de fabrication additive	4
I.1.4 Classification des différents types de prototypage.....	4
I.1.4.1 Prototypage virtuel.....	5
I.1.4.2 Prototypage rapide	5
I.1.5 Généralités sur les procédés de fabrication :	5
I.1.6 Classification des processus FA	6
I.1.7 Intérêt et limites au développement :	7
I.1.7.1 avantages du procédé de fa	7
I.1.7.2 limitations technologiques au développement de la fa dans l'industrie.....	7
I.1.8 Fabrication additive des pièces métalliques.....	8
I.1.9 procédés (fa) métalliques existants.....	8
I.1.10 Procédés utilisant du fil.....	9
I.1.10.1 Laser-fil.....	9
I.1.10.2 faisceau d'électrons-fil.....	9
I.1.10.3 arc-fil.....	10
I.1.10.4 comparaison des procédés :	10
I.2 Différents types de technologies de soudage à l'arc utilisées en WAAM.....	11
I.2.1 Généralités sur le soudage.....	11
I.2.1.1 opération de soudage.....	11
I.2.1.2 différentes sources d'énergie utilisées en soudage	12
I.2.2 Technologie WAAM (WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING)	12
I.2.2.1 différents paramètres du procédé waam	13
I.2.2.2 variation de morphologie et dimensions du cordon.....	14
I.2.2.3 classification du waam :.....	15
I.2.2.4 procédé arc-fil, mig-mag et gmaw	16
I.2.2.5 procédé arc-fil tig (gtaw) :	17
I.2.2.6 procédé à l'arc plasma.....	17
I.3 Procédé CMT (cold metal transfer)	18
I.3.1 Principe du procédé CMT	19
I.3.2 Modes de procède CMT	20
I.3.3 Paramètres de soudage CMT	20

I.4 Aciers	21
I.4.1 Aciers inoxydables.....	21
I.4.1.1 aciers inoxydables ferritiques	21
I.4.1.2 aciers inoxydables austénitiques	22
I.4.1.3 aciers inoxydables austéno-ferritique (duplex).....	22
I.4.1.4 les aciers inoxydables martensitiques	23
I.4.1.5 caractéristiques des aciers inoxydables.....	23

Chapitre II : Techniques et Procédures Expérimentales

II.1 Introduction	24
II.2 Élaboration des échantillons.....	24
II.2.1 Matériau utilisé	24
II.2.2 Procédure d'élaboration des échantillons.....	25
II.3 Préparation des échantillons pour les caractérisations	28
II.4 Techniques de caractérisation	29
II.4.1 Mesure d'épaisseur.....	29
II.4.1 Essai de dureté	29
II.4.3 Essai de traction.....	30
II.4.4 Observation métallographique	31
II.4.3.1 Procédure d'attaque pour métallographie optique:.....	31

Chapitre III: Résultats et Discussion

III.1 Caractérisation géométrique.....	32
III.2 Dureté	35
III.3 Traction	38
III.4 Métallographie	40
Conclusion générale	42

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Principe De La Technologie Additive

Figure I.1 : Tranchage de la pièce.	4
Figure I.2 : Pièce produite par fabrication additive.....	4
Figure I.3 : Étapes principales du procédé de fabrication additive	4
Figure I.4 : Classification des processus am avec les fonctions de manutention correspondantes.	6
Figure I.5 : Schéma De Principe Des Procédés : (A) Projection De Liant, (B) Stratification Decouches, (C) Fusion Sur Lit De Poudre Et (D) Dépôt De Matière Sous Énergie Concentrée.....	8
Figure I.6 : Illustration générique de la technologie par laser-fil.....	9
Figure I.7 : processus faisceau d'électrons-fil	10
Figure I.8 : Représentation schématique d'une coupe transversale d'un assemblage.	12
Figure I.9 : Schéma du processus waam.	13
Figure I.10: Paramètres de fabrication additive waam.....	14
Figure I.11: Section transversale, superposition et juxtaposition de cordons de soudure.....	14
Figure I.12: Typical Classification Of WAAM	15
Figure I.13: Illustrations d'objets décoratifs fabriqués par la superposition de cordons, brevet de 1920	16
Figure I.14: Principe De La Soudure GMAW.	17
Figure I.15: Principe de la soudure tig ou gtaw.	17
Figure I.16: Principe de la soudure plasma paw.	18
Figure I.17: Principe Du Cycle CMT.....	19
Figure I.18: (A) Définition Des Paramètres De Soudage, (B) Structure Du Cordon De Soudure.....	21
Figure I.19 : Microstructure d'Acier Inoxydable Ferritique	22
Figure.I.20 : Microstructure Aciers Inoxydables Austénitiques	22
Figure.I.21 : Microstructure Aciers Inoxydables Austéno-Ferritique (Duplex)	23
Figure.I.22 : Microstructure des aciers martensitiques	23

Chapitre II : Techniques Et Procédures Expérimentales

Figure II.1 : Bobine et fil en acier inoxydable asthénique 316l utilisés.	24
Figure II.2 : Poste À Souder De Type TPS 500i Utilisé.....	25
Figure II.3 : Poste à souder de type tps 500i utilisé.	26
Figure II.4 : Machine-outil à commande numérique (CNC) utilisée.....	27
Figure II.5 : Dimensions fixés pour les pièces à réalisés	27

Figure II.6 : Étapes Du Procédé CMT.	27
Figure II.7 : Fabrication des murs avec des différents courants.	29
Figure II.8 : Micro-Duromètre Q30, Marque Qness, Logiciel Qpibt2	29
Figure II.9 : Empreinte Obtenue.	30
Figure II.10 : Machine d'essais universelle de type zwick roell z100.	30
Figure II.11 : Montage utilisé pour l'attaque électrolytique.....	31
Figure II.12 : Microscope Métallographique..	31

Chapitre III : Résultat Et Discussion

Figure III.1 : Variation de l'épaisseur en fonction de la largeur et la hauteur du mur élaboré à 60a	32
Figure III.2 : Variation de l'épaisseur en fonction de la largeur et la hauteur du mur élaboré à 90a	33
Figure III.3 : Variation de l'épaisseur en fonction de la largeur et la hauteur du mur élaboré à 120a	34
Figure III.4 : Variation de la dureté en fonction de la largeur du mur (60a) pour différentes hauteurs	35
Figure III.5 : Variation de la dureté en fonction de la largeur du mur (90a) Pour Différentes Hauteurs	36
Figure III.6 : Variation de la dureté en fonction de la largeur du mur (120A) pour différentes hauteurs	36
Figure III.7 : Variation de la dureté en fonction de l'épaisseur du mur 60A.....	37
Figure III.8 : Variation de la dureté en fonction de l'épaisseur du mur 90A.....	37
Figure III.9 : Variation de la dureté en fonction de l'épaisseur du mur 120a.....	38
Figure III.10 : Courbes de traction des éprouvettes du mur 60a	38
Figure III.11 : Courbes de traction des éprouvettes du mur 90a	39
Figure III.12 : Courbes de traction des éprouvettes du mur 120a	39
Figure III.13 : Aspect des éprouvettes après la traction.	40
Figure III.14 : Micrographie optique du bas du mur élaboré à 120a	41
Figure III.15 : Micrographie optique du haut du mur élaboré à 120a	41

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des procédés utilisant de fil	11
Tableau I.2 : Classification des géométries de cordons simples.....	15
Tableau II.1 : La composition chimique l'acier inoxydable 316L selon la norme AISI	24
Tableau II.2 : Principales propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 316L selon la norme AISI	25
Tableau III.1 : Tableau de mesure d'épaisseur du mur 1 (60A).....	32
Tableau III.2 : Tableau de mesure d'épaisseur du mur 1 (90A).....	33
Tableau III.3 :Tableau de mesure d'épaisseur du mur 1 (120A).....	34
Tableau III.4 : Résultats des essais de traction.....	39

Introduction

La fabrication additive métallique est une nouvelle technologie qui se développe pleinement ces dernières années avec l'émergence de nouveaux procédés. Elle permet la réalisation de pièces en trois dimensions, souvent par dépôts successifs de couches et offre ainsi de nouvelles libertés de conception et de fabrication par rapport à des méthodes plus traditionnelles comme le forgeage, le moulage et l'usinage. De plus, la fabrication additive permet d'alléger les pièces, d'économiser les matières premières et d'éliminer les opérations d'assemblage.

L'idée de superposer des cordons de métal fondu avec un arc électrique pour fabriquer des pièces n'est pas nouvelle : Ralph Baker déposa un brevet en 1920 dans lequel il décrit une méthode pour fabriquer des objets décoratifs par la superposition de couches de métal fondu avec un arc électrique [1].

Les procédés de fabrication additive que nous connaissons aujourd'hui sont apparus dans les années 80. Durant les années 1990 à 2000, les applications concernent la fabrication de maquettes et de prototypes technologiques. De nos jours, les technologies de fabrication additive permettent de réaliser des pièces fonctionnelles répondant aux attentes du cahier des charges. De nombreux matériaux peuvent être utilisés par ces procédés : les thermoplastiques, les céramiques, les métaux...etc. Une multitude de secteurs comme l'éducation, la recherche et l'industrie fait intervenir la fabrication additive [2].

Toutes les technologies de fabrication additive de fils à arc basées sur la fusion d'un fil métallique avec un arc électrique, qui est ensuite déposé à l'état liquide sur la surface de la construction, où il se solidifie pour former un "cordon". La superposition de ces cordons permet ensuite de fabriquer des pièces. Ces technologies sont directement dérivées des procédés de soudage à l'arc et utilisent le même type de source d'alimentation et de "tête" ou de "torche" pour assurer le dévidage du fil, la fusion et le dépôt de métal. Plusieurs procédés de soudage à l'arc ont ainsi fait l'objet d'applications dans la fabrication additive de pièces métalliques. Les technologies basées sur la création d'un arc entre une électrode réfractaire (non fusible) et la surface des pièces, telles que les technologies Plasma ou TIG (Tungsten Inert Gas), sont les plus précises, car la fusion et le dépôt du métal à l'état liquide sont généralement réguliers. En revanche, les procédés basés sur une électrode fusible, comme le procédé MIG (Metal Inert Gas), permettent des vitesses de dépôt plus élevées, mais souffrent d'instabilités qui produisent généralement un mauvais état de surface des cordons. Cependant, une variante récemment développée du procédé MIG, appelée CMT (Cold Metal Transfer), améliore la qualité des

dépôts. C'est cette dernière méthode que nous avons choisi d'utiliser dans cette étude. L'objectif du travail de recherche présenté dans ce mémoire est d'étudier l'influence des différents paramètres du procédé CMT sur les mécanismes de transfert de métal (fusion et dépôt du fil) et de chaleur, dans le cas de l'utilisation d'un fil métallique en acier inoxydable, en vue de son utilisation en fabrication additive, et la réalisation des pièces de différentes épaisseurs.

Le **Premier chapitre** présente une revue bibliographique des principes et techniques de la fabrication additive, et détaille en particulier les développements récents concernant les procédés basés sur les technologies arc-fil métallique.

Dans le **Chapitre 2**, présente les protocoles utilisés pour l'élaboration et la préparation des échantillons ainsi que les différentes techniques de caractérisation appliquées.

Le **Chapitre 3**, traite l'interprétation des résultats issus des essais de traction et de la dureté, la microstructure matériau pour évaluer la taille des grains de chaque couche déposée.

En fin, on achève le mémoire par une conclusion générale.