



ÉTUDE DES EFFETS DES PARAMÈTRES DE SOUDAGE LASER FIBRE CONTINU – APPLICATION À L’ACIER AISI 304L SOUDÉ SELON DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie
en vue de l’obtention du grade « maître ès sciences appliquées »

(M. Sc. A.)

PAR

© Alaa Abou Haibeh

Octobre 2021

Composition du jury :

Véronique Dassylva-Raymond, présidente du jury, Université du Québec à Rimouski

Noureddine Barka, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

**Sasan Sattarpanah Karganroudi, examinateur externe, Institut Technologique
de Maintenance Industrielle**

Dépôt initial le 10 Août 2021

Dépôt final le 29 Octobre 2021

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

À ma famille

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon superviseur, le professeur Nouredine Barka, dont l'expertise m'a été précieuse pour formuler les questions de recherche et la méthodologie. Vos commentaires perspicaces m'ont poussé à affiner ma réflexion et ont porté mon travail à un niveau supérieur.

Je tiens à remercier mes collègues pour leur merveilleuse collaboration. Je tiens à remercier tout particulièrement le département de mathématiques, d'informatique et d'ingénierie de l'Université du Québec à Rimouski pour son soutien et pour toutes les occasions qui m'ont été données de poursuivre mes recherches.

Je tiens également à remercier mes tuteurs pour leurs précieux conseils tout au long de mes études. Vous m'avez fourni les outils dont j'avais besoin pour choisir la bonne direction et mener à bien mon mémoire.

En outre, j'aimerais remercier mon mari qui m'a soutenue, pour ses conseils avisés et son oreille attentive. Tu es toujours là pour moi. Enfin, je n'aurais pas pu mener à bien ce mémoire sans le soutien de ma famille et de mes amis, qui m'ont apporté encouragements et patience, ainsi que d'heureuses distractions pour me reposer l'esprit en dehors de mes recherches.

RÉSUMÉ

Ce projet a pour but d'étudier la caractérisation métallurgique et mécanique des soudures laser en continu de l'AISI 304L dans différentes positions de soudage, modes de faisceau laser et paramètres de soudage utilisés afin d'exploiter de manière appropriée les avantages offerts par le procédé, d'établir des modèles permettant de prédire les caractéristiques de la soudure dans le cas de soudage bout à bout et par recouvrement sans avoir recours à un processus d'essais et d'erreurs long et coûteux. Pour obtenir des modèles de prédiction précis et robustes, une approche organisée en trois étapes a été adoptée afin d'obtenir les meilleures performances mécaniques et microstructurelles lors de la réalisation d'un soudage laser continu sur deux plaques AISI 304L d'une épaisseur de 2 mm. Des examens microstructuraux, des tests de microdureté et des tests de traction ont été réalisés afin d'estimer les variations de quatre attributs de la qualité de la soudure (largeur du cordon, profondeur de pénétration, résistance/force de traction ultime et microdureté). Les propriétés mécaniques des soudures ont été décrites en termes de résistance à la traction ultime, de forces de traction ultime et de profils de microdureté. Les effets des paramètres de soudage au laser continu fibre de 3 kW (puissance de soudage, vitesse de soudage, diamètre du foyer, fréquence de soudage et pression du gaz de protection) sur la performance des soudures au laser de l'acier inoxydable AISI 304L ont été étudiés à l'aide de la méthode du plan d'expériences de Taguchi. Les effets des paramètres de soudage considérés et leurs contributions à la variation des différentes caractéristiques de la soudure sont analysés à l'aide de l'ANOVA. Ce projet élargit la méthode traditionnelle d'optimisation des performances mécaniques en déterminant statistiquement les effets principaux pour les paramètres de soudage, les positions de soudage et les motifs du faisceau laser, ce qui permet une analyse plus approfondie dans laquelle les résultats expérimentaux sont statistiquement corrélés aux paramètres variables de la machine utilisée.

Trois paramètres de soudage, chacun ayant trois niveaux, ont été utilisés dans la première étape dans la configuration de chevauchement. Les expériences qui mesurent les valeurs de la force de traction ultime des échantillons soudés ont été conçues selon le plan d'expériences de Taguchi et les résultats ont été analysés à l'aide de la méthode ANOVA, la microstructure des échantillons soudés ainsi que la microdureté de la zone de soudure ont été visualisées. Alors que le faisceau laser oscillant a été utilisé dans deux motifs différents (triangulaire et carré) avec trois paramètres de soudage ainsi que trois niveaux pour chacun d'eux dans la deuxième étape dans la configuration bout à bout. La microstructure, la microdureté et les valeurs de résistance à la traction ultime ont été mesurées et analysées pour les échantillons soudés, et il a été constaté que le motif carré a de meilleures propriétés et performances mécaniques que le motif triangulaire, et que les valeurs de résistance à la traction ultime étaient beaucoup plus élevées que celles de la première étape. Enfin, la troisième étape était une étape d'amélioration de la deuxième étape, où le gaz de protection a été ajouté pendant le processus de soudage, en plus d'augmenter la plage de tous les paramètres de soudage à quatre niveaux différents. Cette étape a entraîné une augmentation de la valeur de la contrainte maximale obtenue dans la deuxième étape, et en conséquence de cela, ces étapes sont considérées comme des étapes de développement pour les propriétés mécaniques et la microstructure des plaques AISI 304L soudées par soudage laser continu.

Mots clés : AISI 304L, soudage au laser fibre, microstructure, propriétés mécaniques, faisceau laser oscillant, configuration de chevauchement, configuration en bout, méthode Taguchi, méthode ANOVA.

ABSTRACT

This project aims at investigating the metallurgical and mechanical characterization of AISI 304L continuous laser welds in different weld positions, laser beam modes, and welding parameters used in order to appropriately exploit the advantages offered by the process, to establish models allowing the prediction of the characteristics of the weld in the case of butt and overlap welding without the need for a long and expensive trial-and-error process. To obtain accurate and robust predictive models, an organized three-stage approach was adopted in order to achieve the best mechanical and microstructure performance when performing continuous laser welding on two AISI 304L plates with a thickness of 2 mm. Microstructural examinations, microhardness tests, and tensile tests were performed in order to estimate variations in four attributes of weld quality (bead width, penetration depth, ultimate tensile strength/force, and microhardness). Mechanical properties of the welds were described in terms of ultimate tensile strength, ultimate tensile forces, and microhardness profiles. The effects of 3 fiber continuous laser welding parameters (welding power, welding speed, focal diameter, welding frequency, and shielding gas pressure) on AISI 304L stainless steel laser weld performance was studied using Taguchi's design of experiments method and the effects of the welding parameters considered and their contributions to the variation of the different characteristics of the weld are analyzed using ANOVA.

This project expands the traditional method of mechanical performance-optimizing by determining the main effects statistically for welding parameters, welding positions, and laser beam patterns allowing for a more in-depth analysis wherein the experimental results are statistically correlated to the variable machine parameters used.

Three welding parameters, each of which has three levels, were used in the first stage in the overlap configuration. Experiments that measure the ultimate tensile force values of the welded samples were designed according to Taguchi's design of experiments and the results were analyzed using ANOVA method, the microstructure of the welded samples in addition to the microhardness of the weld area were viewed.

Whereas the oscillating laser beam was used in two different patterns (triangular and square) with three welding parameters as well and three levels for each of them in the second stage in the butt configuration. The microstructure, microhardness, and the ultimate tensile strength values were measured and analyzed for the welded samples, and it was found that the square pattern has better mechanical properties and performance than the triangular pattern, and the ultimate tensile strength values were much higher than the first stage. Finally, the third stage was an improvement stage for the second stage, whereby shielding gas was added during the welding process, in addition to increasing the range of all welding parameters to four different levels, this stage resulted in an increase in the value of the maximum stress obtained in the second stage, and as a result of that, these steps are considered as developmental steps for the mechanical properties and microstructure of the welded AISI 304L plates by continuous laser welding.

Key Words: AISI 304L, Fiber Laser Welding, Microstructure, Mechanical Properties, Oscillating Laser Beam, Overlap Configuration, Butt Configuration, Taguchi Method, ANOVA Method.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ.....	vii
ABSTRACT.....	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
0.1 MISE EN CONTEXTE	1
0.2 SOUDAGE AU LASER	2
0.2.1 Qu'est-ce que le soudage ?	3
0.2.2 Types de procédés de soudage	4
0.2.3 Principes du soudage au laser	7
0.2.4 Mécanisme de soudage au laser	10
0.2.5 Caractéristiques du soudage au laser.....	15
0.2.6 Faisceau laser oscillant.....	16
0.2.6.1 Système de scanner ILV DC	16
0.2.7 Influence des gaz de protection dans le processus de soudage	18
0.3 PROBLEMATIQUE	19
0.4 OBJECTIFS.....	23
0.5 METHODOLOGIE	24
0.6 ORGANISATION DU MÉMOIRE	25
0.7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	27
CHAPITRE 1: OPTIMISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ACIER INOXYDABLE 304L SOUDÉ PAR LASER À L'AIDE DE LA MÉTHODE TAGUCHI DANS LA CONFIGURATION DES JOINTS EN CHEVAUCHEMENT	32
1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE.....	32
1.2 Optimization of Mechanical Properties For 304L Stainless Steel Welded by Laser Using Taguchi Method in Overlap Joint Configuration	33
1.2.1 Abstract.....	33
1.2.2 Introduction.....	33
1.2.3 Experimental Procedure.....	36
1.2.3.1 Experiment Setup.....	36

1.2.3.2 Design of Experiments (DOE)	38
1.2.4 Microstructure, Weld Penetration, and Microhardness Test Results	40
1.2.5 Tensile Test Results	45
1.2.6 Statistical Analysis	46
1.2.6.1 Bead Width Results	46
1.2.6.2 RSM of Bead Width Using ANOVA	48
1.2.6.3 Tensile Test Results	49
1.2.6.4 RSM of Ultimate Tensile Force Using ANOVA	51
1.2.7 Conclusions.....	52
1.2.8 Reference	54
CHAPITRE 2: ÉTUDE COMPARATIVE DES PARAMÈTRES DU FAISCEAU LASER OSCILLANT SUR DES PLAQUES 304L SOUDÉES SELON UNE CONFIGURATION DE JOINT BOUT À BOUT - MOTIFS CARRÉ ET TRIANGULAIRE	56
2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE	56
2.2 Comparative Study of Oscillating Laser Beam Parameters on Welded 304L Plates in Butt Joint Configuration - Square and Triangular Pattern	57
2.2.1 Abstract.....	57
2.2.2 Introduction.....	57
2.2.3 Experimental Procedure.....	59
2.2.3.1 Experiment Setup.....	59
2.2.3.2 Design of Experiments (DOE)	61
2.2.4 Microstructure, and Microhardness Test Results	63
2.2.5 Tensile Test Results.....	66
2.2.6 Statistical Analysis	68
2.2.6.1 Tensile Test Results	68
2.2.6.2 RSM of Ultimate Tensile Strength Using ANOVA.....	70
2.2.7 Conclusions.....	71
2.2.8 Reference	73
CHAPITRE 3: ÉTUDE DE L'EFFET DE L'ARGON SUR LES PERFORMANCES MÉCANIQUES DE PLAQUES EN ACIER INOXYDABLE 304L SOUDÉES EN BOUT À BOUT À L'AIDE D'UN FAISCEAU LASER OSCILLANT	76
3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE	76
3.2 Investigation of Argon Shielding Gas on Mechanical Performances of Butt Welded 304L Plates Using Oscillating Laser Beam	77

3.2.1 Abstract.....	77
3.2.2 Introduction.....	77
3.2.3 Experimental Procedure.....	79
3.2.3.1 Experiment Setup.....	79
3.2.3.2 Design of Experiments (DOE)	81
3.2.4 Microstructure, and Microhardness Test Results	83
3.2.5 Tensile Test Results	86
3.2.6 Statistical Analysis	88
3.2.6.1 Tensile Test Results	88
3.2.6.2 RSM of Ultimate Tensile Strength Using ANOVA.....	90
3.2.7 Conclusions.....	92
3.2.8 Reference	94
CONCLUSION GÉNÉRALE	97

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.1 : Chemical composition of AISI 304L plates (wt%) [26].	37
Table 1.2 : Mechanical properties of AISI 304L plates [27].	37
Table 1.3 : Welding Parameters for each condition and response factors.	38
Table 1.4 : Experimental layout (L_9) showing different welding parameters.	39
Table 1.5 : Cross-sectional metallography of the laser-welded structures.	41
Table 1.6 : Bead Width Measurements in (μm)	42
Table 1.7 : Design of experiment for welding factors and measured experimental results	46
Table 1.8 : ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for the bead width of the welded samples	47
Table 1.9 : ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for the maximum forces of the welded samples	50
Table 2.1 : Chemical composition of AISI 304L plates (wt%) [24].	59
Table 2.2 : Mechanical properties of AISI 304L plates [25].	60
Table 2.3 : Welding Parameters for each condition and response factors	61
Table 2.4 : Experimental layout (L_9) showing different welding parameters	62
Table 2.5 : The front appearance of the laser-welded AISI 304L joints, which represents W1 to W9 samples.	63
Table 2.6 : Design of experiment for welding factors and measured experimental results of the triangular pattern	67
Table 2.7 : Design of experiment for welding factors and measured experimental results of the square pattern.	67
Table 2.8 : ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for σ_{UTS} of square welded samples	69
Table 3.1 : Chemical composition of AISI 304L plates (wt%) [26].	80
Table 3.2 : Mechanical properties of AISI 304L plates [27].	80
Table 3.3 : Welding Parameters for each condition and response factors	81
Table 3.4 : Experimental layout (L_{16}) showing different welding parameters.	82
Table 3.5 : The front appearance of the laser-welded AISI 304L joints, which represents W1 to W16 samples.	83
Table 3.6 : Design of experiment for welding factors and measured experimental results of the σ_{UTS}	87
Table 3.7 : ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for UTS	89

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Types courants de procédés de soudage [22]	6
Figure 0.2 : Densités de puissance pour des sources de chaleur de soudage typiques, et géométrie des cordons de soudure obtenus aux densités respectives [29]	6
Figure 0.3 : Représentation schématique du système de soudage au laser YAG [29].....	8
Figure 0.4 : Exemples de types de joints [22].....	10
Figure 0.5 : Mécanisme de soudage au laser [22]......	11
Figure 0.6 : Coefficient de couplage de l'énergie laser dans un métal tel que l'acier ou un alliage d'aluminium en fonction de la température [29].....	12
Figure 0.7 : Effet du diamètre du faisceau (densité de puissance) et de la vitesse de soudage sur la profondeur de pénétration d'une soudure en acier inoxydable de type 304 réalisée avec un laser à fibre de 6 et 10 kW [29].	14
Figure 0.8 : Photos en coupe de soudures au laser dans de l'acier de type 304 produites avec un laser à fibre de 10 kW à 0,1 m/min dans un gaz de protection Ar à 1 atm (a) et sous un faible vide de 10 kPa (b) [29].....	15
Figure 0.9 : Structure interne du scanner ILV DC [37]	16
Figure 0.10 : Schéma du processus de numérisation [37].....	17
Figure 1.1 : Laser welding sample (before laser welding).....	37
Figure 1.2 : Laser welded sample (after laser welding).....	37
Figure 1.3 : Continuous fiber industrial laser system (IPG YLS-30000).....	38
Figure 1.4 : Weld bead appearances under different welding conditions	40
Figure 1.5 : Optical micrographs of welded AISI 304L showing: (a) HAZ, (b) Fusion Line, and (c) Weld Metal.....	43
Figure 1.6 : Microhardness test configuration; Microhardness plots of welded joints across the fusion zone.	44
Figure 1.7 : Force-Displacement Curves for the nine welded specimens	45
Figure 1.8 : Welded tensile test specimen.....	46
Figure 1.9 : Main effect plots for the welding parameters vs. bead width.....	48
Figure 1.10 : Contour Plots of Welding Parameters vs bead width.	49
Figure 1.11 : Main effect plots for the welding parameters vs. ultimate tensile force.....	51
Figure 1.12 : Contour Plots of Welding Parameters vs Ultimate Tensile Force.....	52
Figure 2.1 : Oscillating laser welded plates.	59
Figure 2.2 : Oscillating laser welded sample for tensile test.....	59
Figure 2.3 : FANUC M-710iC arm type robot with 6-axis.....	61
Figure 2.4 : ILV DC-Scanner.....	61

Figure 2.5 : Optical micrographs of square welded AISI 304L showing: (a) HAZ, (b) Fusion Line, and (c) Weld Metal.....	65
Figure 2.6 : Microhardness test configuration; Microhardness plots of welded joints No.3 and No.6: (a) across the fusion zone, and (b) Through the thickness section.....	66
Figure 2.7 : Welded tensile test specimen.....	67
Figure 2.8 : Stress- Strain Curves for the maximum and minimum σ_{UTS} of the square and triangular pattern.....	68
Figure 2.9 : Main effect plots for the welding parameters vs. ultimate tensile strength	70
Figure 2.10 : Contour Plots of Welding Parameters vs Ultimate Tensile Strength	71
Figure 3.1 : Oscillating laser welded plates.	80
Figure 3.2 : Oscillating laser welded sample for tensile test.....	80
Figure 3.3 : Optical micrographs of shielded square welded AISI 304L showing: (a) HAZ, (b) Fusion Line, and (c) Weld Metal.....	85
Figure 3.4 : Microhardness distribution for specimens No.11, No.2, No.6 and No.7.	86
Figure 3.5 : Welded tensile test specimen.....	86
Figure 3.6 : Stress-Strain curves for the 16 welded specimens.....	87
Figure 3.7 : Main effect plots for the welding parameters vs. ultimate tensile strength	89
Figure 3.8 : Contour Plot of Welding Parameters vs Ultimate Tensile Strength.....	91

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 MISE EN CONTEXTE

Le soudage par faisceau laser (SFL) est en train de devenir l'une des méthodes non conventionnelles et non traditionnelles utilisées comme technique d'assemblage efficace dans l'industrie en raison de sa productivité et de sa flexibilité élevée. Le soudage par faisceau laser fournit une source de chaleur concentrée, permettant des soudures étroites et profondes et des taux de soudage élevés qui se traduisent par de petites zones affectées par la chaleur (ZAC) [1]. Il est donc fréquemment utilisé dans des applications à haut volume utilisant l'automatisation [2], comme dans l'industrie automobile pour le soudage, le découpage, le perçage et le traitement de surface d'une large gamme de matériaux d'ingénierie. Le potentiel du SFL pour les sections épaisses peut être réalisé dans de nombreuses applications industrielles comme les centrales électriques [3,4], la construction navale [5,6] et les pipelines [7-9]. Une large gamme de matériaux peut être assemblée par laser de métaux similaires, de métaux dissemblables, d'alliages et de non-métaux. Les procédés de soudage peuvent être réalisés à l'aide de différentes sources d'énergie : de la flamme de gaz et de l'arc électronique au faisceau d'électrons ou de laser et aux ultrasons. Parmi les sources d'énergie utilisées, le faisceau laser se distingue par sa densité de puissance la plus élevée actuellement disponible dans l'industrie (jusqu'à 109 W/cm^2) et sa capacité à être focalisé sur un petit point (jusqu'à $0,1 \text{ mm}$) [10].

Les métaux d'apport ne sont pas nécessaires et un taux de refroidissement élevé favorise la formation d'une microstructure fine pour améliorer la résistance du matériau sans avoir à subir d'opérations de finition [11]. L'effet des paramètres du processus laser, à savoir la puissance, la vitesse, le diamètre focal, la fréquence et la pression d'argon sur la résistance à la traction du joint de soudure a été étudié. Les caractéristiques mécaniques d'une soudure obtenue par laser dépendent principalement des dimensions du cordon de soudure qui dépendent elles-mêmes des paramètres du procédé. Ce travail s'intéresse aux effets des paramètres du procédé de soudage sur les propriétés mécaniques et métallurgiques de l'acier inoxydable AISI 304L dans différentes conditions de soudage afin d'améliorer ses performances mécaniques, de maximiser la pénétration et de minimiser à la fois la largeur de la zone de fusion et la largeur de la zone affectée par la chaleur (ZAC). Afin d'atteindre ces objectifs, des modèles mathématiques ont été développés pour mettre en relation les paramètres importants du cordon de soudure et les variables d'entrée du soudage laser [12]. Les modèles mathématiques développés et optimisés sont très utiles pour identifier la combinaison correcte et optimale des variables d'entrée du soudage laser, afin d'obtenir une qualité de soudure supérieure à un coût relativement faible.

Les plans d'expérience (DOE) et les techniques statistiques sont largement utilisés pour optimiser les paramètres du processus [13]. Dans la présente étude, les paramètres du processus de soudage du faisceau laser peuvent être optimisés pour maximiser la résistance à la tension et la microdureté de la pièce à usiner, tout en réduisant le nombre d'expériences sans affecter les résultats [14]. Les expériences ont été conçues par la méthode Taguchi en utilisant un tableau orthogonal L₉ pour la première et la deuxième étude et un tableau orthogonal L₁₆ pour la troisième étude. Ce plan a été sélectionné sur la base de trois paramètres de soudage à trois niveaux chacun pour les deux premières études, et de quatre paramètres de soudage à quatre niveaux chacun pour la dernière étude.

Les paramètres de soudage sélectionnés pour la première étude étaient la puissance, la vitesse et le diamètre focal. La deuxième étude a utilisé la puissance, la vitesse et la fréquence comme paramètres de soudage. La troisième étude a utilisé la puissance, la vitesse, la fréquence et la pression du gaz Argon comme paramètres de soudage. Le rapport S/N pour chaque niveau de paramètres de processus est calculé sur la base de l'analyse S/N. Il y a deux catégories de caractéristiques de qualité dans l'analyse du rapport signal/bruit (S/N), c'est-à-dire le critère (le plus petit le meilleur) pour la largeur du cordon, et le critère (le plus grand le meilleur) pour la résistance/force de traction ultime.

Dans ces études, l'objectif est de maximiser la résistance/force à la traction, par conséquent, le niveau optimal des paramètres du processus est le niveau avec le rapport S/N le plus élevé [14,15]. Une analyse statistique de la variance (ANOVA) a également été réalisée pour indiquer quels paramètres du processus sont statistiquement significatifs ; la combinaison optimale des paramètres du processus peut alors être prédite [14]. Ce mémoire commence par une définition du soudage avec une mention des types de soudage les plus courants utilisés dans l'industrie et quelques exemples des types de joints les plus célèbres utilisés également.

Ensuite, elle présente les principes du procédé de soudage laser et les mécanismes impliqués dans son fonctionnement ainsi que l'identification des paramètres qui le contrôlent et qui peuvent avoir le plus grand impact sur la qualité de la soudure. Les sections suivantes expliquent l'importance de ce projet et sa pertinence pour l'industrie tout en soulignant ses contributions et ses résultats potentiels. Ce mémoire mentionne les conclusions les plus importantes tirées des trois étapes qui ont été menées dans le cadre de ce projet pour améliorer les performances mécaniques et microstructurelles des échantillons soudés au laser en AISI 304L.

0.2 SOUDAGE AU LASER

Le laser (rarement écrit L.A.S.E.R.) est un acronyme pour « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » (amplification de la lumière par émission stimulée du rayonnement) [16-18], inventé en 1957 par le pionnier du laser Gordon Gould. Bien que cette signification originale désigne un principe de fonctionnement (l'exploitation de l'émission stimulée d'atomes ou d'ions excités), le terme est maintenant surtout utilisé pour les dispositifs générant de la lumière selon le principe du laser.

Plus précisément, on entend généralement par-là les oscillateurs laser, mais parfois aussi les dispositifs dotés d'amplificateurs laser, appelés amplificateurs de puissance à oscillateur maître (MOPA). Une interprétation encore plus large inclut les dispositifs non linéaires tels que les oscillateurs paramétriques optiques et les lasers Raman, qui produisent également des faisceaux lumineux de type laser et sont généralement pompés par un laser, mais ne sont pas à proprement parler des lasers. Le premier laser était un laser à rubis pompé par une lampe pulsée (un type de laser à l'état solide), démontré par Theodore Maiman en 1960 [19,20]. La même année, le premier laser à gaz (un laser hélium-néon [21]) et la première diode laser ont été fabriqués.

En d'autres termes, le laser est un dispositif qui stimule les atomes ou les molécules pour qu'ils émettent de la lumière à des longueurs d'onde particulières et amplifie cette lumière, produisant généralement un faisceau de rayonnement très étroit. L'émission couvre généralement une gamme extrêmement limitée de longueurs d'onde visibles, infrarouges ou ultraviolettes. De nombreux types de lasers ont été développés, avec des caractéristiques très variées. La lumière laser possède plusieurs propriétés uniques, parmi lesquelles le fait qu'elle est parallèle et très concentrée. Elle peut donc être conduite, par des miroirs ou des fibres de verre, vers une position de soudage éloignée de l'unité de puissance. Elle est également monochromatique, c'est-à-dire à une seule longueur d'onde définie, qui dépend du type de laser utilisé [22].

0.2.1 Qu'est-ce que le soudage ?

Le soudage est un procédé de fabrication permettant d'assembler des matériaux, en utilisant une chaleur élevée pour fondre les pièces ensemble et en les laissant refroidir, ce qui produit une coalescence des matériaux. Le soudage est utilisé pour réaliser des joints permanents et il est considéré comme le principal procédé industriel utilisé pour assembler les métaux [23]. Outre la fusion du métal de base, un matériau d'apport est généralement ajouté au joint pour former un bain de matériau fondu (le bain de soudure) qui refroidit pour former un joint qui, selon la configuration de la soudure (bout à bout, pénétration complète, congé, etc.), peut être plus résistant que le matériau de base (métal-mère). Le soudage nécessite également une forme de blindage pour protéger les métaux d'apport ou les métaux fondus contre la contamination ou l'oxydation.

De nombreuses sources d'énergie différentes peuvent être utilisées pour le soudage, notamment une flamme de gaz (chimique), un arc électrique (électrique), un laser, un faisceau d'électrons, la friction et les ultrasons. Bien qu'il s'agisse souvent d'un procédé industriel, le soudage peut être effectué dans de nombreux environnements différents, notamment à l'air libre, sous l'eau et dans l'espace. Jusqu'à la fin du 19^e siècle, le seul procédé de soudage était le soudage à la forge, que les forgerons utilisaient depuis des millénaires pour assembler le fer et l'acier par chauffage et martelage. Le soudage à l'arc et le soudage oxy-combustible ont été parmi les premiers procédés à se développer à la fin du siècle, et le soudage par résistance électrique a suivi peu après.

La technologie du soudage a progressé rapidement au début du 20^e siècle, les guerres mondiales ayant entraîné une demande de méthodes d'assemblage fiables et peu coûteuses. Ensuite, plusieurs techniques de soudage modernes ont été mises au point, notamment des méthodes manuelles comme le soudage à l'arc avec électrode enrobée, qui est aujourd'hui l'une des méthodes de soudage les plus populaires, ainsi que des procédés semi-automatiques et automatiques comme le soudage à l'arc avec électrode enrobée, le soudage à l'arc submergé, le soudage à l'arc avec fil fourré et le soudage sous laitier électroconducteur. Les développements se sont poursuivis avec l'invention du soudage par faisceau laser, du soudage par faisceau d'électrons, du soudage par impulsion magnétique et du soudage par friction malaxage dans la seconde moitié du siècle. Aujourd'hui, alors que la science continue de progresser, le soudage robotisé est courant dans les milieux industriels, et les chercheurs continuent de développer de nouvelles méthodes de soudage et de mieux comprendre la qualité des soudures.

0.2.2 Types de procédés de soudage

Le nombre de procédés de soudage différents a augmenté ces dernières années. Ces procédés diffèrent grandement dans la manière dont la chaleur et la pression (lorsqu'elles sont utilisées) sont appliquées, et dans le type d'équipement utilisé. L'American Welding Society (AWS) a reconnu plus de 50 types de procédés de soudage différents en fonction du type de matériau soudé, de la source d'énergie, du type d'assemblage et des applications. Les procédés de soudage sont largement divisés en deux types, comme le montre la **figure 0.1 [22]**, qui présente certains des procédés de soudage courants dans l'industrie [24]. Le choix du procédé de soudage pour un travail particulier dépend de nombreux facteurs. Il n'existe pas de règle spécifique régissant le type de procédé de soudage à choisir pour un travail donné. Voici quelques-uns des facteurs qui doivent être pris en compte lors du choix d'un procédé de soudage :

- la disponibilité de l'équipement;
- la répétitivité de l'opération;
- les exigences de qualité (pénétration du métal de base, régularité, etc.);
- l'emplacement du travail;
- les matériaux à assembler;
- l'aspect du produit fini;
- la taille des pièces à assembler;
- le temps disponible pour le travail;
- l'expérience et les compétences des travailleurs;
- le coût des matériaux;
- les exigences du code ou des spécifications.

Un laser est une source de chaleur à haute densité de puissance. Par conséquent, le « soudage au laser » est reconnu comme un processus avancé d'assemblage de matériaux à l'aide d'un faisceau laser de haute puissance et de haute densité énergétique. Les profils représentatifs de la densité de puissance du laser, du faisceau d'électrons, du plasma et de l'arc, ainsi que les géométries des cordons de soudure qui en découlent sont illustrés schématiquement à la [figure 0.2](#). La densité de puissance d'un faisceau laser, qui est équivalente à celle d'un faisceau d'électrons, est beaucoup plus élevée que celle de l'arc ou du plasma. Par conséquent, un trou de serrure profond et étroit est formé pendant le soudage avec un faisceau laser ou électronique à haute densité de puissance, et une soudure à pénétration profonde et étroite peut être produite efficacement. Pour le soudage par faisceau d'électrons, il faut utiliser une chambre à vide et une protection contre les rayons X. Pour les plaques d'acier, un traitement de démagnétisation est nécessaire avant le soudage. Le soudage à l'arc et au plasma ne peut pas être utilisé dans un environnement sous vide ; cependant, le soudage au laser peut être effectué et un cordon de soudure sain et profond peut être produit de manière similaire au soudage par faisceau d'électrons. En général, la vitesse de déplacement du soudage au laser est plus élevée que celle du soudage à l'arc et au plasma.

Parmi tous les procédés de soudage, le soudage au laser peut produire une variété de joints de métaux ou de plastiques allant de feuilles très minces d'environ 0,01 mm d'épaisseur à des plaques épaisses d'environ 50 mm dans un gaz de protection tel que l'hélium (He), l'argon (Ar) ou parfois l'azote (N₂) dans l'environnement de l'air, et il a gagné une grande popularité en tant que technologie d'assemblage prometteuse avec une haute qualité, une haute précision, une haute performance, une haute vitesse, une bonne flexibilité et une faible distorsion. Il peut également réaliser la robotisation, la réduction de la main-d'œuvre, l'automatisation complète et la systématisation des lignes de production. Par conséquent, les applications du soudage laser augmentent parallèlement au développement de nouveaux appareils laser et de nouveaux procédés d'assemblage. Afin d'appliquer correctement les lasers pulsés ou à ondes continues (PW ou CW) au soudage ou à l'assemblage, il est important de connaître les spécifications et les capacités des appareils laser, les facteurs affectant la pénétration de la soudure et les défauts de soudage, les mécanismes et le comportement du soudage, ainsi que d'évaluer la soudabilité des matériaux et les propriétés mécaniques des joints soudés [\[25-28\]](#).

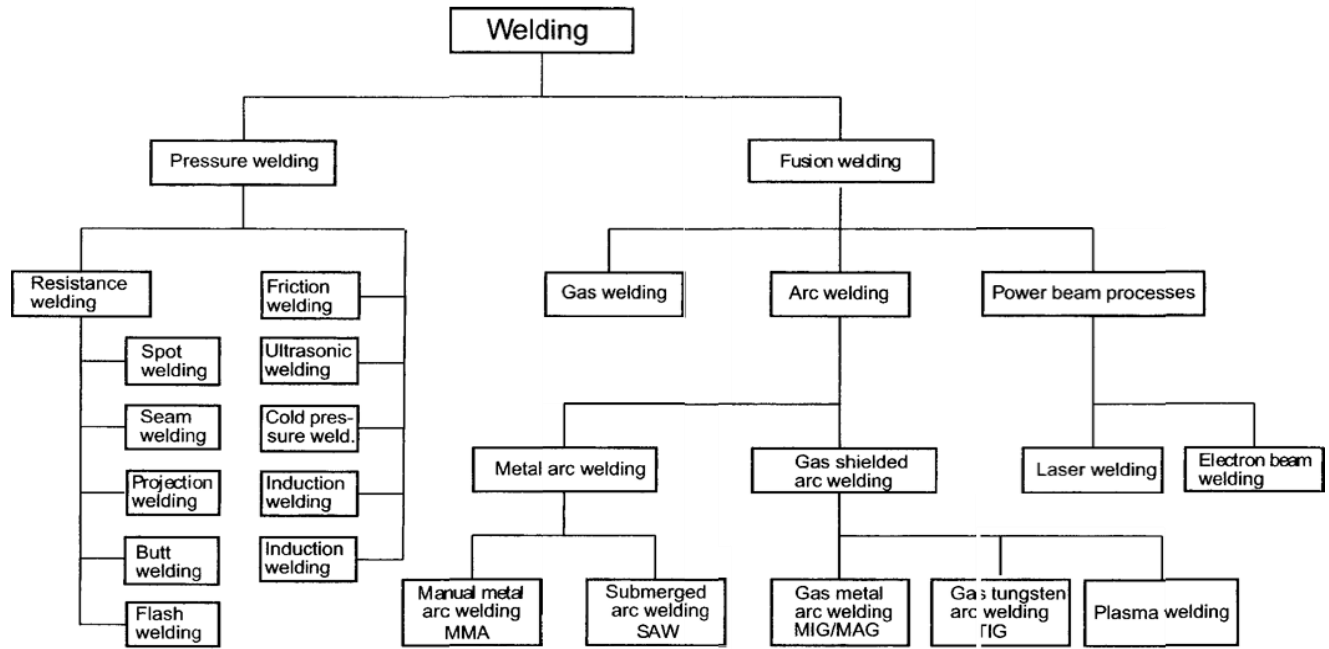


Figure 0.1 Types courants de procédés de soudage. [22]

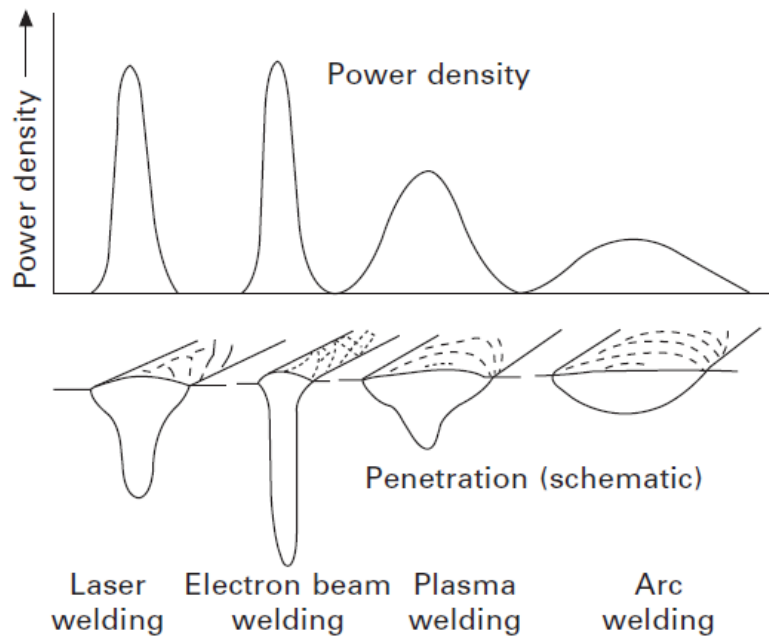


Figure 0.2 Densités de puissance pour des sources de chaleur de soudage typiques, et géométrie des cordons de soudure obtenus aux densités respectives [29].

0.2.3 Principes du soudage au laser

L'émission laser est déterminée par les règles de la mécanique quantique, qui limitent les atomes et les molécules à des quantités discrètes d'énergie stockée qui dépendent de la nature de l'atome ou de la molécule. Le niveau d'énergie le plus bas pour un atome individuel se produit lorsque ses électrons sont tous dans les orbites les plus proches possibles de son noyau. Cette condition est appelée l'état fondamental. Lorsqu'un ou plusieurs électrons d'un atome ont absorbé de l'énergie, ils peuvent se déplacer vers des orbites extérieures, et l'atome est alors dit "excité". Les états excités ne sont généralement pas stables ; lorsque les électrons passent d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau d'énergie inférieur, ils émettent l'énergie supplémentaire sous forme de lumière.

Einstein a reconnu que cette émission pouvait être produite de deux manières. Habituellement, des paquets discrets de lumière, appelés photons, sont émis spontanément, sans intervention extérieure. Par ailleurs, un photon qui passe peut stimuler un atome ou une molécule pour qu'il ou elle émette de la lumière, si l'énergie du photon qui passe correspond exactement à l'énergie qu'un électron libère spontanément en tombant dans une configuration de plus basse énergie. Le processus qui domine dépend du rapport entre les configurations de basse énergie et de haute énergie. Normalement, les configurations de basse énergie prédominent.

Cela signifie qu'un photon émis spontanément a plus de chances d'être absorbé et de faire passer un électron d'une configuration de basse énergie à une configuration de haute énergie que de stimuler une configuration de haute énergie pour qu'elle tombe dans une configuration de basse énergie en émettant un second photon. Tant que les états de basse énergie seront plus courants, l'émission stimulée disparaîtra. Cependant, si les configurations d'énergie supérieure prédominent (une condition connue sous le nom d'inversion de population), les photons émis spontanément sont plus susceptibles de stimuler d'autres émissions, générant une cascade de photons. La chaleur seule ne produit pas une inversion de population ; certains processus doivent exciter sélectivement les atomes ou les molécules. En général, cela se fait en illuminant le matériau laser avec une lumière vive ou en le faisant passer par un courant électrique [30].

Le système laser est constitué de trois éléments importants :

1) Le milieu actif ou milieu laser :

Le milieu actif est le principal facteur déterminant de la longueur d'onde de fonctionnement, et d'autres propriétés, du laser. Il existe des centaines de milieux actifs différents dans lesquels le fonctionnement du laser a été réalisé. Le milieu de gain est excité par la source de pompage pour produire une inversion de population, et c'est dans le milieu de gain qu'a lieu l'émission spontanée et stimulée de photons conduisant au phénomène de gain ou d'amplification optique. Le milieu de gain peut être constitué de cristaux solides tels que le rubis ou le Nd : YAG, de colorants liquides, de gaz tels que le CO₂ ou l'hélium/le néon, ou de semi-conducteurs tels que le GaAs. Les lasers sont nommés en fonction de la nature de leur milieu lasant [31].

Les types de lasers de soudage les plus courants sont le laser CO₂ et le laser Nd : YAG, ce dernier étant généralement utilisé pour les matériaux plus fins et le premier pour les matériaux plus épais. Le faisceau laser peut être pulsé ou continu. Un faisceau laser continu ou pulsé peut être utilisé en fonction de l'application. Les impulsions d'une durée de quelques millisecondes sont utilisées pour souder des matériaux fins tels que les lames de rasoir, tandis que les systèmes laser continus sont employés pour les soudures profondes. La **figure 0.3 [29]** illustre la représentation schématique des systèmes de soudage au laser YAG utilisés dans le cadre de ce travail, où les lasers Nd : YAG, d'une longueur d'onde de 1,070 nm, sont délivrés par une fibre optique et fonctionnent en mode continu.

2) *Une source d'énergie (appelée pompe ou source de pompage) :*

La source de pompage est la partie qui fournit l'énergie au système laser. Les exemples de sources de pompage comprennent les décharges électriques, les lampes flash, les lampes à arc, la lumière d'un autre laser, les réactions chimiques et même les dispositifs explosifs. Le type de source de pompage utilisé dépend principalement du milieu de gain.

3) *Résonateur optique constitué d'un miroir ou d'un système de miroirs :*

Le résonateur optique ou cavité optique, dans sa forme la plus simple, est constitué de deux miroirs parallèles placés autour du milieu de gain qui assurent la rétroaction de la lumière. La lumière du milieu produite par l'émission spontanée est renvoyée par les miroirs dans le milieu où elle peut être amplifiée par émission stimulée. L'un des miroirs reflète essentiellement 100 % de la lumière laser, tandis que l'autre reflète moins de 100 % de la lumière laser et transmet le reste.

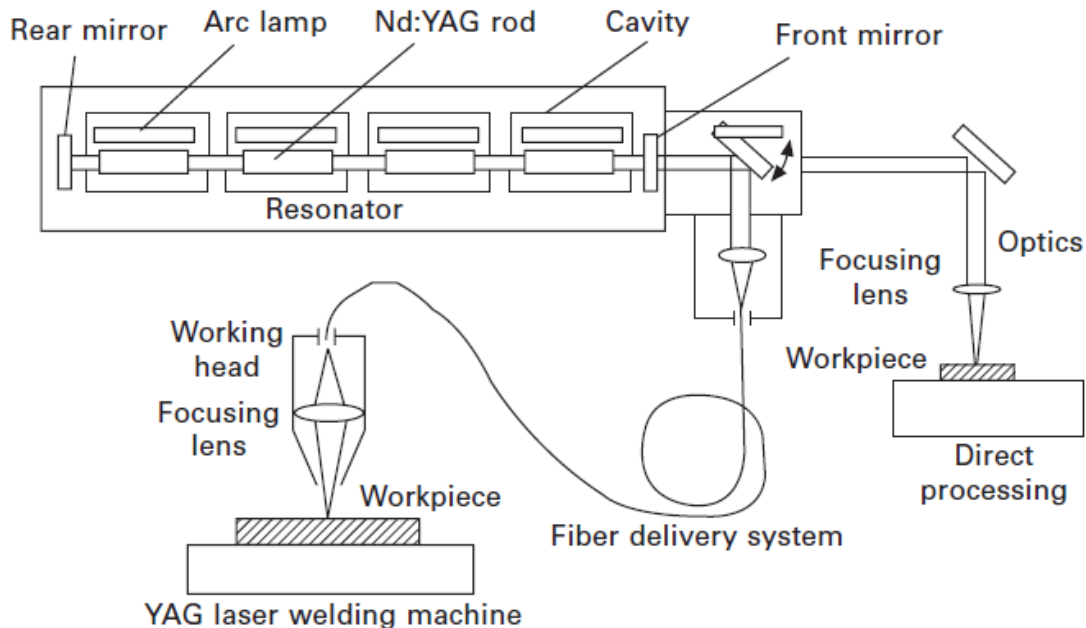


Figure 0.3 Représentation schématique du système de soudage au laser YAG [29].

Les inversions de population peuvent être produites dans un gaz, un liquide ou un solide, mais la plupart des milieux laser sont des gaz ou des solides. Généralement, les gaz laser sont contenus dans des tubes cylindriques et excités par un courant électrique ou une source lumineuse externe, que l'on dit « pomper » le laser. De même, les lasers à l'état solide peuvent utiliser des semi-conducteurs ou des cristaux transparents avec de petites concentrations d'atomes émetteurs de lumière. Un résonateur optique est nécessaire pour accumuler l'énergie lumineuse dans le faisceau. Le résonateur est formé en plaçant une paire de miroirs l'un en face de l'autre de sorte que la lumière émise le long de la ligne entre les miroirs est réfléchi dans les deux sens. Lorsqu'une inversion de population est créée dans le milieu, la lumière réfléchi dans les deux sens augmente en intensité à chaque passage dans le milieu laser. L'autre lumière fuit autour des miroirs sans être amplifiée. Dans une cavité laser réelle, un ou les deux miroirs transmettent une fraction de la lumière incidente. La fraction de la lumière transmise - c'est-à-dire le faisceau laser - dépend du type de laser. Si le laser génère un faisceau continu, la quantité de lumière ajoutée par émission stimulée à chaque aller-retour entre les miroirs est égale à la lumière émergente du faisceau plus les pertes dans le résonateur optique. La combinaison d'un milieu laser et d'une cavité résonante forme ce que l'on appelle souvent simplement un laser mais qui, techniquement, est un oscillateur laser. L'oscillation détermine de nombreuses propriétés du laser et signifie que le dispositif génère de la lumière en interne. Sans miroirs et cavité résonnante, un laser ne serait qu'un amplificateur optique, qui peut amplifier la lumière provenant d'une source externe, mais pas générer un faisceau en interne.

Elias Snitzer, chercheur à American Optical, a fait la démonstration du premier amplificateur optique en 1961, mais ces dispositifs ont été peu utilisés jusqu'à la diffusion des communications basées sur la fibre optique [30]. La substance active du laser utilisé est le néodyme, sous forme de dopant dans un barreau transparent de grenat d'yttrium aluminium. L'énergie est fournie par un tube flash, du même principe que celui utilisé dans les appareils photo. La longueur d'onde de la lumière émise est de 1,06 μm , mais elle se situe toujours dans la section infrarouge invisible du spectre. Une différence importante est que la longueur d'onde plus courte permet à la lumière d'être transportée par des fibres optiques et focalisée avec des lentilles ordinaires. Cela présente des avantages pratiques substantiels et permet d'utiliser le laser pour le soudage robotisé. Les problèmes dus à la présence de plasma absorbant sont moindres lorsque l'on soude avec des lasers Nd : YAG, ce qui permet d'utiliser de l'argon et des mélanges de gaz argon/CO₂. Des résultats acceptables peuvent même être obtenus sans gaz de protection lors du soudage par points ou à faible puissance. Ce type de laser est particulièrement adapté au soudage de matériaux autrement difficiles comme le tantale, le titane, le zirconium, l'Inconel, etc. Son inconvénient est qu'il n'est pas disponible avec des puissances aussi élevées, et qu'il tend donc à être limité à des épaisseurs de métal allant jusqu'à 6mm. Cependant, le développement augmente les puissances disponibles ; en combinaison avec la possibilité d'utiliser des conducteurs de lumière à fibre optique, cela rend ce type de laser potentiellement très attractif [22].

0.2.4 Mécanisme de soudage au laser

Il existe différents types de joints soudés au laser, comme le montre la [figure 0.4](#). Les joints bout à bout et à recouvrement sont généralement soudés avec des lasers PW ou CW. Les types de joints sont choisis en fonction de la méthode de soudage et de l'épaisseur de la plaque. Le joint idéal offre la résistance et la qualité structurelle requise sans un volume de joint inutilement important. Le coût de la soudure augmente avec la taille du joint, et l'apport de chaleur plus élevée entraîne des problèmes de résistance à l'impact et de distorsion. La préparation du joint peut également être coûteuse ; il est donc préférable d'utiliser des types de joints dont les faces font partie de la pièce. Dans ce travail, des configurations de joints bout à bout et à recouvrement ont été utilisés.

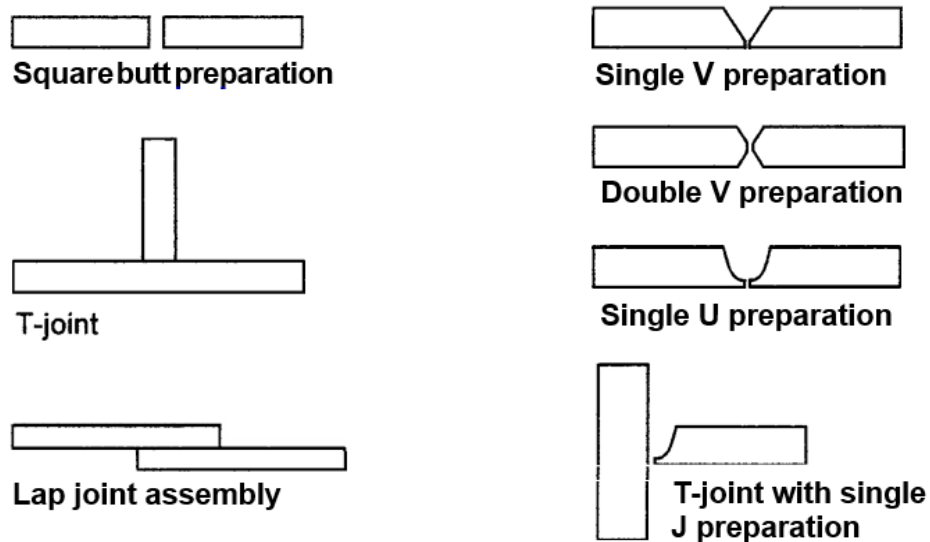


Figure 0.4 Exemples de types de joints [22].

Les phénomènes typiques du soudage laser PW et CW sont illustrés schématiquement dans la [figure 0.5](#). En fonction du temps d'irradiation du laser et de la densité de puissance, une soudure par points ou par bourrelets est formée dans la morphologie d'un type de conduction thermique ou d'un type de trou de serrure. Lorsqu'un faisceau laser est projeté sur la plaque métallique par une lentille ou des miroirs en un point de seulement quelques dixièmes de millimètre de diamètre afin de fournir une densité d'énergie élevée, l'absorption de l'énergie laser est causée par l'interaction contre les électrons libres dans le métal, le transfert des électrons à l'intérieur de la bande, et l'interaction des électrons en mouvement contre le réseau métallique, les défauts, les imperfections et les perturbations du potentiel. La température de la surface de la plaque augmente par le transfert de l'énergie laser en énergie thermique.

L'absorption du laser augmente légèrement avec l'augmentation de la température dans le solide et considérablement au-dessus de la température de fusion, et la température de la zone irradiée par le laser augmente jusqu'à la température d'ébullition. Une cavité ou un trou de serrure est formé par la pression de recul due à l'évaporation.

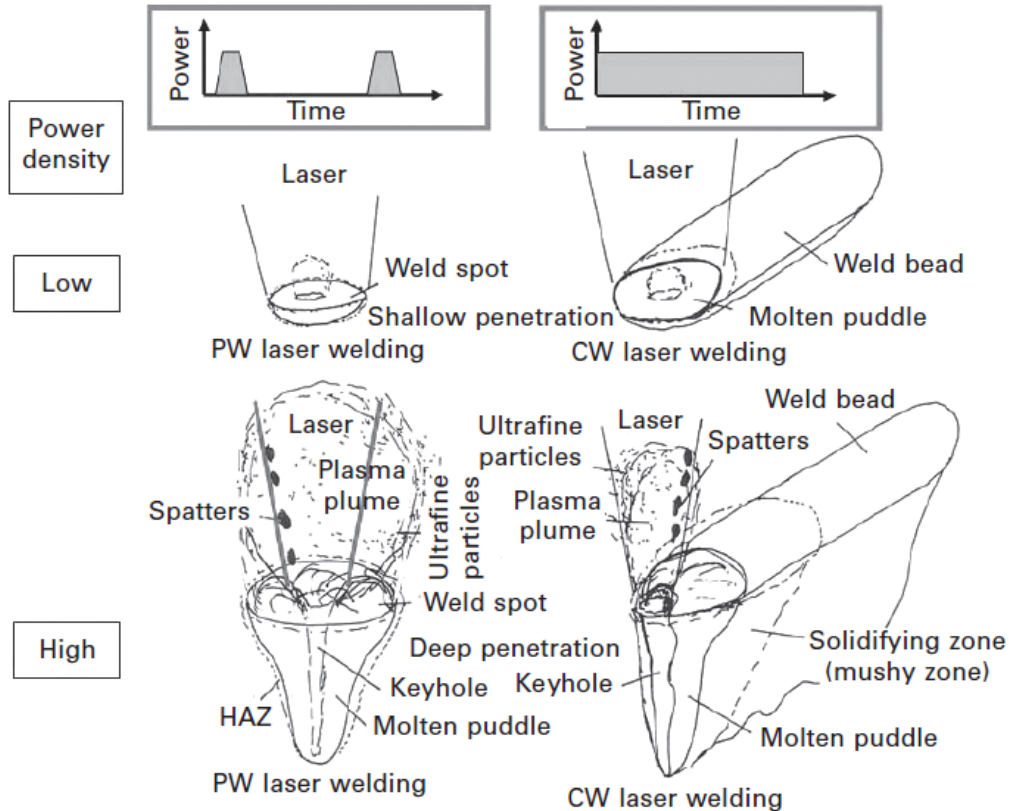


Figure 0.5 Mécanisme de soudage au laser [22].

Le coefficient de couplage (absorption) de l'énergie laser dans le métal est représenté schématiquement sur la **figure 0.6**. Il augmente en fonction de la température et des conditions de surface. Comme l'absorption du laser est extrêmement élevée en raison de la multiréflexion vers l'intérieur dans le cas de la formation d'un trou de serrure, le soudage par pénétration profonde de type trou de serrure est considéré comme un procédé d'assemblage efficace. Un panache brillant d'atomes et de vapeurs métalliques évaporées est éjecté de la partie irradiée par le laser, en particulier d'un trou de serrure. La projection de gouttelettes de métal fondu, causée par un fort courant du panache éjecté, se produit parfois à l'entrée d'un trou de serrure.

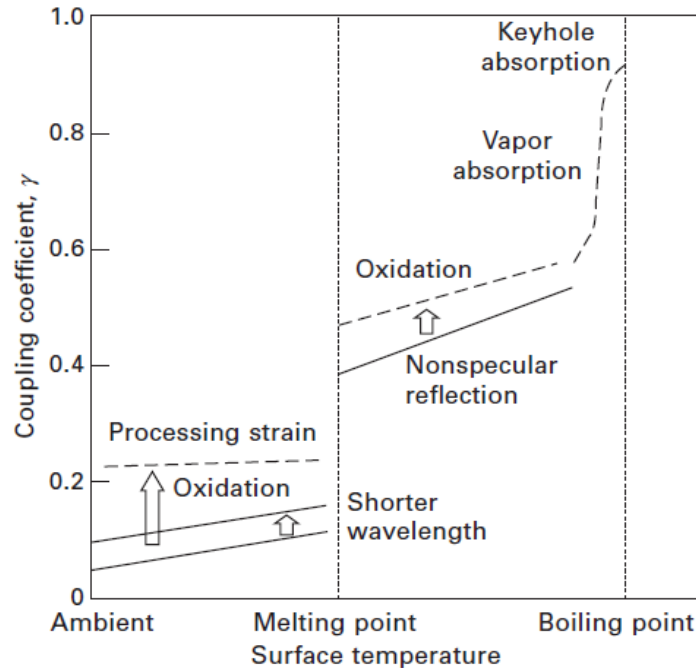


Figure 0.6 Coefficient de couplage de l'énergie laser dans un métal tel que l'acier ou un alliage d'aluminium en fonction de la température [29].

Comme lors de la troisième étape, un gaz de protection à base d'argon a été utilisé pour empêcher l'air de réagir avec le matériau et pour protéger la lentille des éclaboussures et de la vapeur. Dès que le faisceau s'est déplacé et que l'apport de chaleur a été interrompu, le métal se solidifie rapidement, car la zone chauffée est petite. Par conséquent, la taille de la zone affectée par la chaleur est également petite, et la distorsion est négligeable. La pénétration de la soudure dépend de la puissance de sortie du laser. Aucun matériau d'apport n'est utilisé, sauf pour le soudage hybride. La vitesse de soudage dépend de la puissance du laser et peut être élevée lorsque des matériaux minces sont soudés : jusqu'à 10-50 m/min, et même 100 m/min pour le soudage de feuilles. En d'autres termes, le soudage au laser est rapide ; environ deux fois plus rapide que le soudage au plasma et huit fois plus rapide que le soudage TIG.

Les soudures sans pores à haute résistance, les excellentes tolérances dimensionnelles et la productivité élevée rendent cette méthode supérieure à la plupart des autres dans de nombreuses applications. En outre, le soudage au laser est propre et silencieux. Comme le soudage par faisceau d'électrons (EBW), le soudage par faisceau laser a une densité de puissance élevée (de l'ordre de 1 MW/cm²), ce qui se traduit par de petites zones affectées par la chaleur et des vitesses de chauffage et de refroidissement élevées. La taille du spot du laser peut varier entre 0,2 mm et 13 mm, bien que seules les tailles plus petites soient utilisées pour le soudage. La profondeur de pénétration est proportionnelle à la quantité de puissance fournie mais dépend également de l'emplacement du point focal. La pénétration est maximale lorsque le point focal se trouve légèrement en dessous de la surface de la pièce.

Les soudures à pénétration profonde sont produites efficacement par le soudage laser CW à haute puissance. Les profondeurs de pénétration des soudures en acier inoxydable réalisées avec des lasers à fibre de différents diamètres de faisceau à 6 et 10 kW dans un gaz de protection Ar sont illustrées à la **figure 0.7**. Dans le soudage laser à fibre à haute puissance, une pénétration profonde peut être obtenue même avec un gaz de protection Ar, bien que la pénétration soit réduite en raison de l'absorption de Bremsstrahlung inverse par la formation d'un plasma de gaz Ar dans le cas d'un blindage Ar dans le soudage laser CO₂ [27]. La pénétration est plus faible avec l'augmentation de la vitesse de soudage, et à des vitesses élevées, elle est plus profonde à une densité de puissance plus élevée pour un diamètre de faisceau plus petit. Il est entendu que l'effet de la puissance du laser est plus dominant à basse vitesse. La pénétration est plus profonde à 10 kW qu'à 6 kW à une vitesse inférieure à 3 m/min (50 mm/s). À faible vitesse de soudage, la porosité se forme facilement, tandis qu'à vitesse élevée, la porosité est évitée, mais des bosses ou des éclaboussures entraînant un sous-remplissage se produisent en fonction du diamètre plus petit ou plus large du faisceau, respectivement. Dans certaines conditions, les défauts de soudage tels que la porosité, les fissures, les bosses, le sous-remplissage, etc. se forment facilement.

Un inconvénient du soudage au laser est que le faible rapport largeur/profondeur de la géométrie de la soudure peut entraîner des fissures thermiques, notamment lors du soudage d'aciers à haute teneur en carbone. En outre, les aciers trempés peuvent être localement durcis par la vitesse rapide de refroidissement. Le faisceau laser n'ayant qu'un diamètre de quelques dixièmes de millimètre, cette méthode est sensible aux tolérances et nécessite donc des gabarits et des montages très précis. Toutefois, les matériaux plus fins peuvent souvent être soudés par recouvrement, ce qui réduit les exigences de précision. Les coûts d'investissement sont élevés, mais les prix baissent et on peut s'attendre à ce que le soudage au laser soit beaucoup plus utilisé à l'avenir. Le soudage au laser est souvent utilisé pour le soudage de matériaux qui ne peuvent accepter qu'un faible apport de chaleur, par exemple certains aciers inoxydables et matériaux trempés, ou pour le soudage de composants dans l'industrie électronique. Cette méthode est également utilisée lorsque des pièces compliquées nécessitent une grande précision, par exemple dans les industries de l'automobile, de la mécanique générale et de l'aérospatiale.

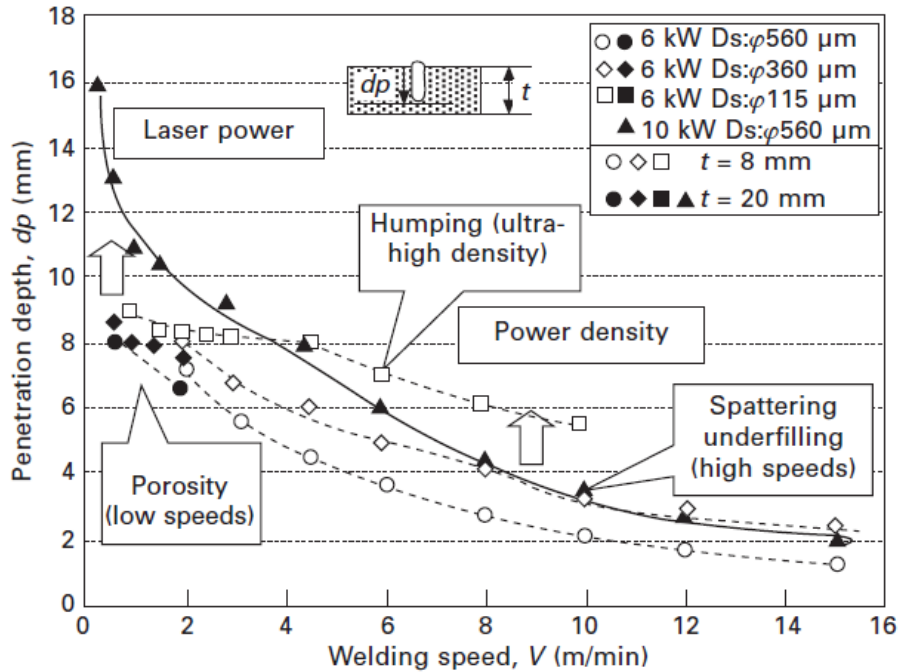


Figure 0.7 Effet du diamètre du faisceau (densité de puissance) et de la vitesse de soudage sur la profondeur de pénétration d'une soudure en acier inoxydable de type 304 réalisée avec un laser à fibre de 6 et 10 kW [29].

Dans des conditions de vide faible et élevé, il est possible de produire des soudures à pénétration extrêmement profonde, comme le montre la **figure 0.8**. Les profondeurs de pénétration des soudures laser produites à faible vitesse dans le vide (dans des conditions de vide même faible) sont comparables à celles des soudures par faisceau d'électrons [32]. Le soudage au laser est également applicable à l'assemblage de plastiques similaires ou dissemblables, de métaux dissemblables comme les fontes et les aciers, les aciers et les alliages d'aluminium, ou de métaux et de plastiques [33].

La surveillance en cours de processus, la détection en ligne ou un système de contrôle adaptatif pendant le soudage laser sont nécessaires pour produire une soudure laser saine et de haute qualité [27,28]. La réflexion d'un faisceau laser et le rayonnement thermique d'une pièce irradiée au laser et d'un bain de fusion sont des candidats importants pour les signaux de surveillance [34,35]. Ces derniers sont également utilisés pour la rétroaction ou le contrôle adaptatif [35]. L'observation directe des phénomènes pendant le soudage laser est également importante pour la compréhension des mécanismes de formation des défauts de soudage. Récemment, de grands progrès ont été réalisés dans cette recherche et les systèmes ont été utilisés dans des applications pratiques.

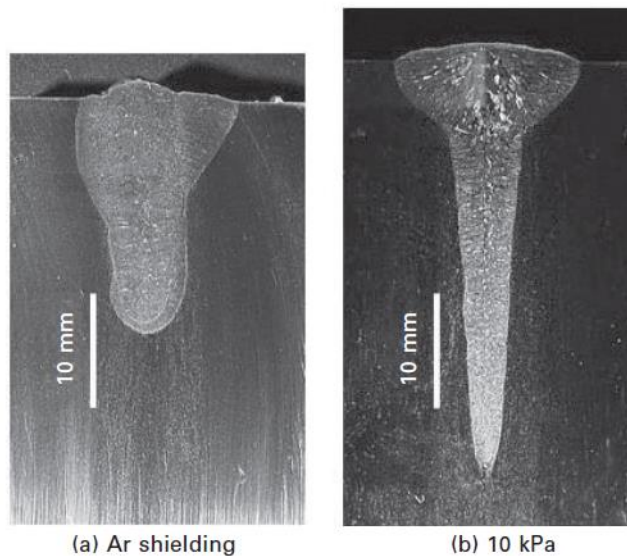


Figure 0.8 Photos en coupe de soudures au laser dans de l'acier de type 304 produites avec un laser à fibre de 10 kW à 0,1 m/min dans un gaz de protection Ar à 1 atm (a) et sous un faible vide de 10 kPa (b) [29].

0.2.5 Caractéristiques du soudage au laser

Le soudage au laser est une méthode impliquant une haute densité d'énergie, qui produit les caractéristiques suivantes [22] :

- les soudures sont normalement réalisées sous forme de soudures bout à bout;
- les soudures sont étroites, avec un rapport pénétration/profondeur élevé;
- la préparation du joint doit être effectuée avec soin, en assurant un positionnement précis;
- un contrôle minutieux de la trajectoire du faisceau le long du joint est essentiel;
- la productivité peut être élevée par rapport aux méthodes conventionnelles;
- l'apport de chaleur est faible en termes absolus, ce qui entraîne de faibles contraintes résiduelles et une faible déformation de la pièce;
- la reproductibilité et les tolérances sont également bonnes, car la méthode est mécanisée;
- de nombreux matériaux et combinaisons de matériaux autrement difficiles peuvent être soudés;
- cette méthode est parfaite pour l'étanchéité des chambres à vide.

0.2.6 Faisceau laser oscillant

Presque en même temps que l'introduction de la technologie laser dans la pratique du soudage, les scientifiques ont cherché à étendre les techniques d'application du soudage, telles que les systèmes laser pulsés, la technique à faisceaux multiples et de nombreuses variantes du soudage hybride au laser. En plus de ces procédures éprouvées, les recherches portent sur les manipulations de processus, qui utilisent des systèmes de balayage optique. Une des caractéristiques de cette technologie est l'oscillation périodique du faisceau par des miroirs mobiles, intégrés dans le trajet du faisceau entre le laser et la pièce. Ainsi, différents modèles d'oscillation peuvent être générés, ce qui permet d'influencer directement le dépôt d'énergie [36].

0.2.6.1 Système de scanner ILV DC

L'effet du soudage laser oscillant sur la microstructure a été étudié à l'aide d'un système de scanner DC fabriqué par ILV (Ingenieurbüro für Lasertechnik und Verschleißschutz) dont le siège est à Schwalbach, en Allemagne. La structure interne du système de scanner (**figure 0.9**) est composée d'un miroir oscillant refroidi à l'eau et entraîné par un moteur à courant continu. Les amplitudes d'oscillation sont ajustées en fonction des applications de soudage spécifiques. Le courant de commande peut avoir une forme d'onde carrée ou triangulaire à une fréquence comprise entre 150 Hz et 450 Hz et oscille transversalement par rapport à la direction de soudage, comme le montre la **figure 0.10**. La fréquence du signal influence directement l'oscillation du miroir [37].

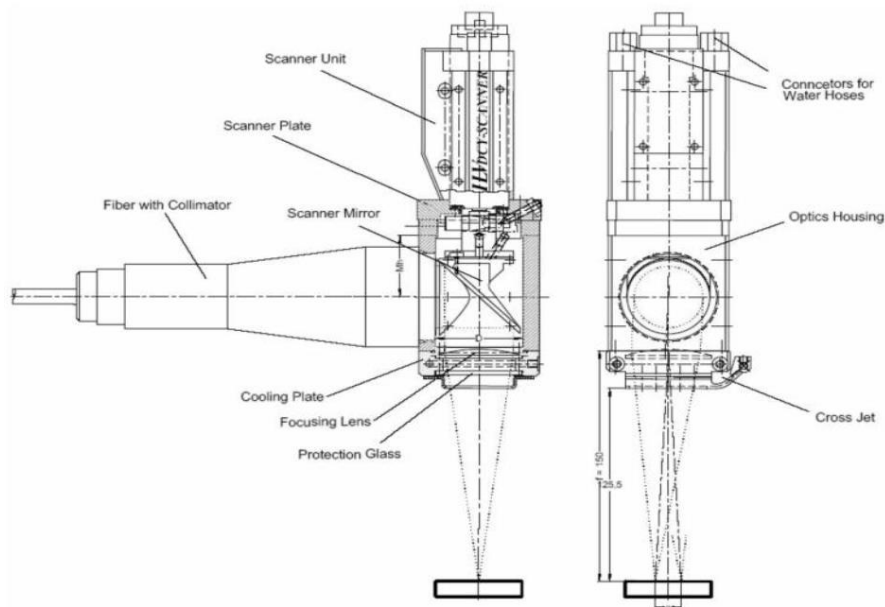


Figure 0.9 Structure interne du scanner ILV DC [37].

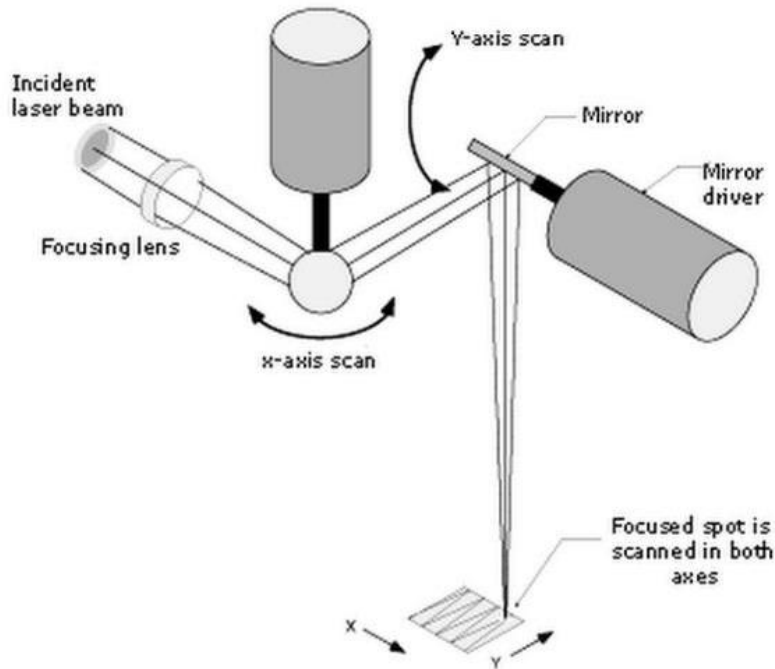


Figure 0.10 Schéma du processus de numérisation [37].

Le faisceau laser transmis par la fibre entre dans un galvanomètre sous forme de lumière parallèle après expansion et collimation. Le galvanomètre contrôle la direction du mouvement du faisceau par l'intermédiaire de deux miroirs rotatifs. Ensuite, le faisceau laser est focalisé sur la surface de la pièce à travers une lentille $f-\theta$. Enfin, le faisceau laser focalisé à haute densité d'énergie fait fondre le matériau.

En faisant osciller le faisceau laser à une fréquence élevée avec une amplitude donnée, la zone de haute intensité énergétique est élargie. Il en résulte une expansion du trou de serrure pendant le soudage au laser, de sorte que davantage de matériau sera fondu dans le cordon de soudure. Le processus devient moins critique pour les entrefers et pour le positionnement du faisceau laser.

Cette oscillation du faisceau laser n'exige pratiquement aucune réduction de la vitesse de soudage par rapport au procédé non oscillant pour obtenir les mêmes pénétrations. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en oscillant, l'énergie disponible est utilisée plus efficacement. Lors du soudage sans oscillation pour des combinaisons de tôles fines en configuration bout à bout, il y a toujours une perte d'énergie à travers les plaques en cas de pénétration complète. Avec l'oscillation, la perte d'énergie est moindre et l'efficacité du processus est meilleure.

En oscillant le faisceau laser, il est plus facile de combiner des tôles avec des rapports d'épaisseur plus importants, même jusqu'à un rapport de 3. Cela signifie qu'une combinaison de 0.8 et 2.4 mm, par exemple, peut être soudée ensemble avec une transition douce. Le soudage sans tissage du point focal est également possible mais le processus sera très critique pour la position du faisceau laser et la transition résultante entre les deux plaques ne sera pas très lisse [38]. Pour les échantillons appliqués par scanner (2 mm d'épaisseur), l'amplitude était fixe (1 mm). De plus, le courant de contrôle est passé du triangle au carré pour étudier l'effet du type de signal. La longueur focale du faisceau laser était de 250 mm. Dans ce travail, en particulier dans la deuxième étape, les trajectoires du laser de balayage oscillant sont des trajectoires carrées et triangulaires formées par le galvanomètre laser. De plus, un chemin de mouvement du faisceau laser carré a été formé pour la troisième étape.

0.2.7 Influence des gaz de protection dans le processus de soudage

Les gaz de protection ont une importance considérable dans la protection du métal fondu contre la contamination atmosphérique pendant les procédés de soudage. Ces gaz jouent un rôle important dans un certain nombre d'aspects du soudage, notamment les caractéristiques de la soudure et la microstructure des pièces soudées. Il est donc important de comprendre l'influence des gaz de protection de soudage sur les différents matériaux, et de nombreux chercheurs ont réalisé des études et des expériences approfondies. Les gaz de protection dans les procédés de soudage au laser ont un effet remarquable sur la performance globale du système de soudage. La principale fonction de ces gaz est de protéger le bain de soudure des réactions indésirables aux gaz atmosphériques. L'oxygène, l'azote et la vapeur d'eau présents dans l'air ambiant peuvent provoquer une contamination de la soudure. Le blindage des soudures implique donc toujours l'élimination des gaz potentiellement réactifs du voisinage de la soudure, empêchant ainsi les effets néfastes de l'atmosphère environnante sur le métal fondu.

Le gaz de protection interagit également avec le métal de base et le métal d'apport et peut ainsi modifier les propriétés mécaniques de base de la zone soudée, telles que la résistance, la ténacité, la dureté et la résistance à la corrosion. Les gaz de protection ont en outre des effets importants sur la formation du cordon de soudure et le schéma de pénétration. L'application de différents gaz de protection peut donner lieu à des profils de pénétration et de cordon de soudure différents. La porosité de la soudure est l'un des défauts de soudage les plus courants liés à l'atmosphère de protection. Les pores peuvent être le point d'initiation de la propagation des fissures dans le joint soudé et peuvent considérablement diminuer le cycle de vie des joints soumis à des charges dynamiques [39 - 42]. Pour la troisième étape, le gaz de protection Argon a été utilisé pendant le processus de soudage dans quatre niveaux de pression différents pour étudier ses effets.

0.3 PROBLEMATIQUE

Le soudage par faisceau laser est devenu un procédé industriel important en raison de ses avantages exceptionnels en comparant avec des autres techniques d'assemblage largement utilisées. Le soudage au laser peut assembler des pièces à des vitesses très rapides ou produire des soudures à pénétration profonde de manière efficace dans n'importe quel environnement tel que l'air, le gaz de protection ou le vide. Par conséquent, il est connu comme un procédé d'assemblage de haute qualité, de haute précision, à faible distorsion, à faible déformation, à haute efficacité, à haute performance, à haute flexibilité et à haute vitesse. Il facilite également la robotisation, l'automatisation, l'économie de main-d'œuvre, la systématisation, etc. En tant qu'alternative aux adhésifs ou aux soudures courants utilisés pour le processus d'assemblage, le soudage par faisceau laser offre un certain nombre de caractéristiques attrayantes telles que l'élimination des matériaux d'apport, une largeur étroite et une pénétration profonde, une résistance mécanique plus élevée, une plus grande résistance aux vibrations et aux chocs, une dégradation minimale des composants sensibles à la chaleur pendant l'assemblage et une fiabilité accrue [33]. Cette technique offre également une faible distorsion thermique, un processus sans contact, une répétabilité, une capacité d'automatisation et un rendement élevé, ce qui a conduit la communauté industrielle à reconnaître, accepter et apprécier la capacité du laser à réaliser un soudage de précision. En outre, la polyvalence du laser a également permis de remplacer les systèmes de soudage par résistance (par points et à la molette), par gaz inerte au tungstène, par ultrasons et par faisceau d'électrons [34].

Le soudage au laser, qui est une technique précise, peu coûteuse, hautement fiable et automatisée, est maintenant répandu dans divers secteurs industriels allant de la microélectronique à la construction navale [35]. Dans l'industrie automobile, en particulier, il est de plus en plus utilisé pour souder les petites pièces complexes préfabriquées et sensibles à la chaleur de l'injecteur de carburant à la carrosserie de l'automobile en vue d'organiser plusieurs niveaux de sous-ensembles, car la pièce finale ne peut pas être faite d'une seule pièce. L'arrivée récente de la nouvelle génération de lasers à solide basée sur la technologie Nd- YAG, à disque ou à fibre, émettant dans la région du proche infrarouge dans la gamme de 1,03-1,07 micron, a renouvelé et fortement amplifié l'intérêt d'utiliser ces types de lasers pour le processus de soudage. Par rapport aux lasers CO₂, leur plus grande capacité à transporter cette longueur d'onde avec une fibre offre un avantage incomparable pour les applications industrielles, notamment lorsque des robots anthropomorphes sont utilisés. De plus, ces lasers ont maintenant un très haut niveau de fiabilité, avec des rendements élevés et atteignent actuellement des puissances CW jusqu'à plusieurs dizaines de kW, avec une qualité de faisceau exceptionnelle atteignant presque la limite de diffraction. Pour ces raisons, ils sont devenus un outil très populaire dans les technologies d'assemblage où des performances et une qualité élevée ainsi qu'une bonne flexibilité sont requises pour le soudage de nombreux matériaux différents.

En conséquence, les applications du soudage au laser dans de nombreux domaines industriels augmentent avec le développement des lasers à dioxyde de carbone (CO₂), des lasers YAG, des lasers à diode (LD), des lasers à solide pompés par LD, des lasers à disque et des lasers à fibre de haute puissance, haute efficacité ou haute qualité. Cependant, des imperfections de soudage ou des défauts entraînant une fracture ou un désastre des produits manufacturés ou des constructions peuvent se produire dans des conditions inappropriées. Afin de fabriquer des produits ou des constructions sains de haute qualité et de haute fiabilité avec un faisceau laser, il est inévitablement important d'établir des procédures préventives pour les défauts de soudage et de prendre les mesures nécessaires sur la base de la compréhension des phénomènes de soudage ainsi que de leurs conditions et mécanismes de formation [43]. Les aciers inoxydables sont classés principalement en fonction de leur microstructure. Les principaux groupes de base sont les matériaux martensitiques, ferritiques, austénitiques et duplex (austénitiques et ferritiques). Ces aciers inoxydables ont une bonne résistance à l'oxydation, même à haute température, et ils sont souvent appelés alliages à haute résistance. Ils sont largement utilisés dans les secteurs de l'automobile pour fabriquer différentes pièces d'un véhicule automobile, ainsi que pour leurs propriétés mécaniques telles que la combinaison d'une résistance élevée et d'une excellente formabilité avec une ténacité et une résistance aux chocs acceptables dans les composants finis pour la plupart des applications techniques.

Les aciers inoxydables austénitiques (ASS) ont de larges perspectives d'application dans les industries en raison de leur résistance à la corrosion et à l'oxydation de haute qualité en plus de leurs propriétés mécaniques supérieures [44]. Ces aciers sont soumis à une sensibilisation lorsqu'ils sont mis en œuvre à des températures élevées, que ce soit en fabrication ou en service [45]. Les propriétés mécaniques des ASS de grade 304L dépendent de la modification relative de la microstructure ainsi que de la micro-texture [46]. La distribution non homogène des éléments d'alliage entraîne une fluctuation de la composition entre le métal de base, la zone affectée par la chaleur (ZAC) et la zone soudée, ce qui se traduit par une variation des propriétés mécaniques et métallurgiques [47]. La dissemblance des propriétés est due à la formation de composés intermétalliques et à la précipitation de carbures métalliques [48]. Le carottage, qui est l'influence de la vitesse de refroidissement sur la transformation de phase ($F \rightleftharpoons A$) dans la zone soudée de l'acier, est également une caractéristique essentielle [49]. Dans la fabrication de produits, de composants ou d'équipements en acier inoxydable, les fabricants utilisent le soudage comme principale méthode d'assemblage. La plupart des aciers inoxydables sont soudables et un joint soudé peut offrir une résistance à la corrosion, une solidité et une économie de fabrication optimales. Là encore, ces propriétés mécaniques et la géométrie du cordon des joints soudés sont les principaux facteurs qui déterminent la qualité du soudage. Il est donc de la plus haute importance d'acquérir la connaissance de la façon dont les paramètres du processus de soudage au laser affectent les caractéristiques du cordon de soudure, et comment optimiser ces paramètres afin de produire d'excellents joints soudés.

Lors du soudage au laser, divers défauts ou imperfections peuvent apparaître en fonction des types de matériaux et de leurs compositions, des conditions de soudage, etc. Les défauts de soudage au laser sont classés en trois groupes caractéristiques : les défauts géométriques ou d'apparence, les défauts internes ou invisibles, et les défauts de propriété ou de qualité [43,50]. Dans le soudage au laser, la porosité se forme facilement dans les soudures profondément pénétrées, caractérisées par un soudage au laser à haute puissance. La fissuration par solidification et la fissuration par liquation peuvent se produire dans les zones de fusion de la soudure laser et dans la zone affectée par la chaleur (ZAC), respectivement, dans les alliages d'aluminium, les alliages à base de nickel, etc. Ces défauts internes entraînent une dégradation des propriétés mécaniques ou peuvent provoquer une défaillance catastrophique, et leur détection est parfois difficile. Il convient donc de prévenir la porosité et les fissures de solidification.

Les paramètres de soudage doivent être sélectionnés de manière à obtenir une pénétration plus profonde avec des largeurs plus petites pour la zone fusionnée [2]. Alexandra P Costaa et al [51] ont travaillé sur le soudage par faisceau laser de métaux durs à l'acier et ont examiné la soudabilité par faisceau laser de métaux durs à l'acier avec un laser CO₂ de haute puissance et un laser Nd : YAG. Balasubramian K R et al. [52] ont travaillé sur la modélisation mathématique et ANN du soudage au laser Nd : YAG de fines feuilles d'acier inoxydable et ont comparé le modèle de réseau neuronal et le modèle de régression linéaire multiple. Padmanabhan G et al. [53] ont travaillé sur l'optimisation des paramètres du processus de soudage par faisceau laser pour obtenir une résistance à la traction maximale de l'alliage de magnésium AZ31B et ont conclu que la vitesse de soudage a la plus grande influence sur la résistance à la traction, suivie par la puissance du laser et la position focale. Dhavalkumar K Soni et al. [54] ont mené une enquête expérimentale et une prédiction du processus de soudage au laser pour des feuilles d'acier doux 2062 de 1 mm en utilisant un laser à fibre. Ils ont mené l'expérience et conçu le travail expérimental en utilisant le logiciel Design Expert. Ils ont prédit les réponses de sortie par un réseau neuronal artificiel (ANN) en utilisant MATLAB.

Considérant que le soudage est généralement effectué dans le but de produire un bon joint à un faible coût. L'optimisation des paramètres du processus peut améliorer la qualité du produit et minimiser le coût de la réalisation de nombreuses expériences et réduit également le gaspillage des ressources, il est également impossible de réaliser un soudage à faible coût et une bonne jonction sans optimisation. La combinaison optimale des paramètres du processus peut être prédite. Des méthodes d'essai et d'erreur ont été utilisées précédemment pour déterminer les conditions optimales du processus pour la qualité requise du joint de soudure [55,56]. La géométrie du cordon de soudure est considérée comme un aspect important dans la détermination des propriétés mécaniques des joints soudés. Cela montre que la sélection des paramètres appropriés du processus de soudage est plus importante pour obtenir une géométrie optimale du cordon de soudure [57-59]. La combinaison de la puissance du laser, de la vitesse de déplacement et de la position focale est plus importante pour obtenir une forme correcte de la section transversale [60].

Ces études précédentes sur les soudures d'acier inoxydable austénitique ont montré que (a) les propriétés mécaniques du matériau soudé peuvent être significativement différentes de celles du métal de base, et (b) qu'il existe une gamme de propriétés mécaniques de la soudure en fonction de la composition et du procédé de soudage. Cependant, ces travaux précédents reposaient sur l'extraction de barres de traction à partir de soudures à grande échelle, ce qui serait excessivement difficile avec les soudures submillimétriques produites par le soudage laser. Par conséquent, l'étude actuelle cherche à extraire la réponse constitutive locale dans l'acier inoxydable austénitique soudé au laser [61]. Le soudage à l'aide d'un faisceau laser oscillant est un processus de production bien établi, qui a connu un regain d'intérêt depuis que les lasers de haute puissance avec une qualité de faisceau supérieure et une puissance de sortie pratiquement illimitée sont devenus abordables [62]. Le soudage laser avec oscillation du faisceau à haute fréquence est étudié comme une méthode permettant d'augmenter la stabilité du processus de soudage. La stabilité du faisceau et du processus à des niveaux de puissance élevée ouvre de nouvelles possibilités de manipulation du faisceau [63]. Les faisceaux de haute puissance produisent des soudures profondes en forme de clou avec un rapport profondeur/largeur élevé, cependant, leur applicabilité est limitée en raison des exigences extrêmes en matière de précision d'ajustement du joint [64].

Une façon de surmonter ce problème consiste à faire osciller le faisceau laser sur le joint selon un modèle prédéterminé [65]. La recherche d'une gamme croissante d'applications est également motivée par les progrès réalisés dans l'équipement de distribution du faisceau, car les dimensions réduites de la tête de traitement améliorent l'accessibilité du joint et la flexibilité globale du processus de soudage [66,67]. L'oscillation du faisceau distribue l'énergie du faisceau sur une zone plus large et produit des joints entièrement pontés et sans défaut. L'oscillation du faisceau distribue l'énergie du faisceau sur une zone plus large et produit des joints entièrement pontés et sans défaut, avec d'excellentes caractéristiques géométriques, au prix d'une vitesse de traitement légèrement réduite [68]. En outre, l'oscillation du faisceau permet de contrôler la vitesse de refroidissement, ce qui est bénéfique pour l'assemblage de matériaux dissemblables et difficiles à souder, comme les alliages d'aluminium et les aciers à haute résistance utilisés dans les industries automobile et aérospatiale [69]. Des études utilisant un faisceau laser multimode oscillant dans le soudage de joints à recouvrement dans de l'acier zingué et de l'AISI 304 ont présenté les avantages du soudage avec un petit diamètre de faisceau à puissance réduite avec oscillation par rapport au soudage laser conventionnel, tout en notant que la connaissance du comportement du matériau est cruciale pour une application réussie de cette technique [70,71].

0.4 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce mémoire est de mener une série d'études scientifiques et systématiques sur le soudage au laser de l'AISI 304L en vue d'acquérir des connaissances sur les diverses conséquences des interactions laser-matériau et de les appliquer directement comme solutions aux problèmes associés au soudage au laser dans la ligne de production et de développer des modèles prédictifs du comportement mécanique et de la performance microstructurale des plaques soudées en AISI 304L en fonction des paramètres du processus sans recourir au long et coûteux processus d'essais et d'erreurs. Dans ces études, le laser fibre à onde continue est utilisé pour souder l'AISI 304L dans des configurations de joint à recouvrement et de joint bout à bout respectivement. Les étapes de ce mémoire permettent d'analyser et de quantifier les effets des paramètres du procédé sur la qualité de la soudure et leurs contributions à la variation de ces différentes caractéristiques en utilisant des outils statistiques. À partir de ces étapes, plusieurs options de modèles de prédiction sont établies et évaluées selon des critères spécifiques dans le but d'obtenir le modèle de prédiction le plus précis et le plus robuste possible.

Le premier objectif de ce mémoire est de réaliser un plan expérimental structuré combiné à des techniques d'analyse statistique éprouvées pour analyser les effets de différents paramètres de processus sur la géométrie du cordon de soudure et ses caractéristiques microstructurelles, qui affectent les propriétés mécaniques des composants soudés en acier inoxydable austénitique de type 304L formant des joints à recouvrement. Le deuxième objectif de ce mémoire est d'étudier les effets des paramètres du modèle de poutre oscillante de deux patrons de soudure carrés et triangulaires de l'AISI 304L sur les caractéristiques de la soudure dans la configuration bout à bout. Les effets de la puissance, de la vitesse et de la fréquence du laser sur la résistance à la traction, la microdureté et la microstructure doivent être étudiés en utilisant les modèles empiriques développés par Taguchi. Finalement, le troisième objectif de ce mémoire est de faire une étude d'amélioration à partir des résultats de la deuxième étape pour améliorer le comportement mécanique et les performances microstructurelles en utilisant la pression du gaz de protection comme paramètre supplémentaire de soudage.

Dans le cadre de ce travail, une approche pour contrôler les propriétés mécaniques en fonction des paramètres de soudage laser pour les plaques AISI 304L a été proposée. Les paramètres étudiés sont la vitesse de déplacement du point focal, la puissance d'émission de l'énergie laser, le diamètre du point focal du faisceau laser, la fréquence de soudage et la pression du gaz de protection. La contribution importante de cette étude est la définition des règles de contrôle des paramètres de soudage laser pour une prédiction efficace des propriétés mécaniques (microdureté, résistance à la rupture et force de rupture) et de l'aspect de la microstructure (dimensions du cordon de soudure). La complexité de ce développement nécessite la prise en compte du dispositif expérimental à l'échelle du laboratoire (cellule laser, machines de métallographie et machines d'évaluation des propriétés mécaniques), pour la validation des formules, des résultats et des modèles.

Pour réaliser des courbes de niveau avec des intervalles de réponse variables en fonction des paramètres de soudage laser, l'analyse expérimentale RSM (response surface method), qui est une technique d'analyse statistique, est utilisée dans ce travail car elle a l'avantage d'être facile à appliquer et simple à interpréter.

0.5 MÉTHODOLOGIE

L'identification du type de corrélations entre les paramètres du processus de soudage laser et la géométrie de la soudure est fondamentale pour comprendre et contrôler le processus de soudage. L'approche adoptée pour atteindre les objectifs de ce projet est divisée en trois étapes. Les étapes de ce travail traitent de l'analyse expérimentale de la résistance/force de traction ultime, de la variation du profil de microdureté le long des zones de soudage des plaques, et des dimensions microstructurelles des plaques soudées. Cette analyse sera effectuée par analyse de variance ANOVA pour extraire les effets des paramètres sur les procédés. Le plan expérimental est basé sur le plan d'expériences de Taguchi.

La première étape de ce travail est consacrée au développement d'une approche prédictive des propriétés mécaniques, basée sur une analyse statistique des données expérimentales, d'un spécimen de plaque en acier inoxydable AISI 304L et avec des dimensions de (117.5×21×1.8) mm, en configuration de chevauchement et sans utiliser de gaz de protection pendant le processus de soudage et en considérant que la distance entre les parties soudées est égale à zéro. En tant que paramètres les plus influents sur la qualité des soudures laser, la puissance du laser et la vitesse de soudage sont considérées comme la base des investigations proposées. La largeur du cordon, la profondeur de pénétration, la microstructure, la résistance/force de traction ultime et la microdureté sont les attributs de la soudure à évaluer. La détermination des effets entre les paramètres et la qualité de la soudure est également destinée à fournir des informations précieuses pour l'identification des variables les plus importantes afin de construire des modèles prédictifs précis et robustes.

La deuxième étape de ce projet est d'identifier et d'analyser les relations entre les paramètres du processus de soudage par laser oscillant en utilisant des motifs carrés et triangulaires, et la forme et les dimensions du cordon de soudure, ainsi que la performance mécanique dans le cas du soudage de plaques AISI 304L avec des dimensions de (125×50×2) mm en configuration bout à bout et aussi sans utiliser un gaz de protection pendant le processus de soudage et en considérant que la distance d'espacement entre les parties soudées est égale à zéro. Cette étude permettra d'extraire les effets, les contributions et l'interaction entre les facteurs tels que la puissance de soudage, la vitesse de soudage et la fréquence de soudage et de faire une comparaison entre les motifs oscillants utilisés pour améliorer ses performances.

La troisième et dernière étape est consacrée à l'amélioration des performances mécaniques et microstructurelles du meilleur motif résultant de la deuxième étape dans le cas du soudage de plaques AISI 304L avec des dimensions de (125×50×2) mm en configuration bout à bout et en utilisant un gaz de protection pendant le processus de soudage et en considérant que la distance entre les parties soudées est égale à zéro. L'une des originalités de cette étape est de considérer la pression du gaz de protection comme un paramètre à part entière.

Les essais expérimentaux sont réalisés sur des plaques AISI 304L. Un laser fibre est utilisé pour l'étude, il émet un faisceau d'une longueur d'onde de 1070 nm et d'une puissance maximale de 3000W. Un plan expérimental, basé sur la méthode Taguchi, est choisi pour obtenir le maximum de résultats avec le minimum d'essais. Les facteurs considérés sont la puissance du laser, la vitesse de soudage, le diamètre du faisceau, la fréquence de soudage et la pression du gaz de protection.

Les attributs de qualité de la soudure notés sont la largeur et la profondeur du cordon de soudure, la microdureté et la résistance/force de traction ultime. Les échantillons, une fois soudés, sont traités selon une procédure métallographique standard comprenant la coupe, le polissage, la gravure et l'observation microscopique. Une analyse statistique ANOVA est effectuée sur les résultats afin de pouvoir déduire les effets des paramètres considérés et leurs contributions à la variation des différentes caractéristiques.

0.6 ORGANISATION DU MÉMOIRE

En plus de cette introduction générale, ce mémoire est divisé en trois chapitres rédigés sous forme d'articles, et il est terminé par une conclusion générale. L'introduction générale présente le soudage en général et le soudage au laser en particulier et se concentre sur l'explication des concepts du processus de soudage au laser. Le premier chapitre se concentre principalement sur l'optimisation de la géométrie du cordon de soudure et de ses caractéristiques microstructurelles, qui affectent les propriétés mécaniques des composants soudés d'un échantillon de 1.8 mm d'épaisseur d'acier inoxydable austénitique de type 304L formant des joints à recouvrement.

Le deuxième chapitre présente une étude comparative sur le soudage au laser de deux schémas de soudage carré et triangulaire de l'AISI 304L qui ont été réalisés en formant des joints bout à bout. Les effets de la puissance, de la vitesse et de la fréquence du laser sur la résistance à la traction, la microdureté et la microstructure ont été étudiés en utilisant les modèles empiriques développés par Taguchi. En outre, le comportement en traction de la soudure sélectionnée de motifs triangulaires et carrés a été effectué pour comprendre le comportement mécanique de la soudure.

Le troisième chapitre présente une étude sur l'effet de l'ajout de gaz argon au processus de soudage au laser oscillant à motif carré sur les propriétés mécaniques du métal soudé AISI 304L dans le formage des joints bout à bout qui a résulté dans le deuxième chapitre, donc ce projet sera une étude complémentaire pour le projet précédent. Les tests pour ce projet ont été basés sur la conception de Taguchi et ses résultats ont été analysés sur la base de la méthode ANOVA pour obtenir le meilleur modèle mathématique qui prédit la réponse de manière adéquate dans les limites des paramètres d'entrée.

Enfin, une conclusion générale met brièvement en évidence les objectifs de ce mémoire et les résultats obtenus dans le cadre de ce projet et confirme les liens entre eux. Cette conclusion générale illustre l'importance de ce mémoire pour les futurs travaux de recherche.

0.7 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Chen, H. C., Pinkerton, A. J., Li, L., Liu, Z., & Mistry, A. T. (2011). Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications. *Materials & design*, 32(2), 495-504.
- [2] Dawes, C. T. (1992). *Laser welding: a practical guide*. Woodhead Publishing.
- [3] Shimokusu, Y., Fukumoto, S., Nayama, M., Ishide, T., & Tsubota, H. (2000). Application of high-power YAG laser welding to stainless steel tanks. *Mitsubishi Juko Giho*, 37(3), 118-121.
- [4] Ishide, T., Tsubota, S., Nayama, M., Shimokusu, Y., Nagashima, T., & Okimura, K. (2000, February). 10-kW-class YAG laser application for heavy components. In *High-Power Lasers in Manufacturing* (Vol. 3888, pp. 543-550). International Society for Optics and Photonics.
- [5] Roland, F. R. A. N. K. (2002). Laser welding in shipbuilding-an overview of the activities at Meyer Werft. *Welding Research Abroad*, 49(4), 39-51.
- [6] Tsirkas, S. A., Papanikos, P., Pericleous, K., Strusevich, N., Boitout, F., & Bergheau, J. M. (2003). Evaluation of distortions in laser welded shipbuilding parts using local-global finite element approach. *Science and Technology of Welding and Joining*, 8(2), 79-88.
- [7] Moore, P. L., Howse, D. S., & Wallach, E. R. (2004). Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 9(4), 314-322.
- [8] Yapp, D., & Blackman, S. A. (2004). Recent developments in high productivity pipeline welding. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26, 89-97.
- [9] Hecht, J. (2009). Fiber lasers ramp up the power. *Laser Focus World*, 45(12), 53-57.
- [10] Dawes, C. (1992) *Laser Welding: A Practical Guide*. Redwood Press Ltd, Cambridge. <http://dx.doi.org/10.1533/9781845698843>
- [11] Berretta, J. R., de Rossi, W., das Neves, M. D. M., de Almeida, I. A., & Junior, N. D. V. (2007). Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(9), 960-966.
- [12] Benyounis, K. Y., Olabi, A. G., & Hashmi, M. S. J. (2005). Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. *Journal of materials processing technology*, 164, 978-985.
- [13] Anawa, E. M., & Olabi, A. G. (2008). Optimization of tensile strength of ferritic/austenitic laser-welded components. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(8), 571-577.
- [14] Anawa, E. M., & Olabi, A. G. (2008). Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components. *Optics & Laser Technology*, 40(2), 379-388.
- [15] Anawa, E. M., Olabi, A. G., & Elshukri, F. A. (2009, August). Modeling and optimization of tensile shear strength of Titanium/Aluminum dissimilar welded component. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 181, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.
- [16] Gould, R. G. (1959, June). The LASER, light amplification by stimulated emission of radiation. In *The Ann Arbor conference on optical pumping, the University of Michigan* (Vol. 15, No. 128, p. 92).

- [17] "laser". Dictionary.com. Retrieved May 15, 2008.
- [18] Ryback, C. (2001). Book Review: Laser: the inventor, the Nobel laureate, and the thirty-year patent war/Simon & Schuster, New York, 304 pp., 2000, ISBN 0-684-83515-0. *Astronomy*, 29(3), 100.
- [19] Maiman, T. H. (1960). Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical review letters*, 4(11), 564.
- [20] Maiman, T. H. (1961). Optical maser action in ruby. *Advances in Quantum Electronics*, 91.
- [21] Javan, A., Bennett Jr, W. R., & Herriott, D. R. (1961). Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Physical Review Letters*, 6(3), 106.
- [22] Weman, K. (2011). *Welding processes handbook*. Elsevier.
- [23] Sangwan, S. S., & Mohal, S. Research Developments in Laser Welding-A.
- [24] Jeffus, L. (2020). *Welding: principles and applications*. Cengage Learning.
- [25] Katayama S (2012), 'Laser welding', Ferrum (Bulletin of the Iron and Steel Institute of Japan), 17(1) 18–29 (in Japanese).
- [26] Katayama S (2012), 'Laser welding of aluminum alloys', Keikinzoku (Journal of Japan Institute of Light Metals), 62(2) 75–83 (in Japanese).
- [27] Katayama S (2005), 'New development in laser welding', in *New Developments in Advanced Welding*, ed. by N. Ahmed. Cambridge: Woodhead Publishing pp. 158–197.
- [28] Katayama S (2010), 'Understanding and improving process control in pulsed and continuous wave laser welding', in *Advances in Laser Materials Processing – Technology, Research and Applications*, eds. by J. Lawrence, J. Pou, D. K. Y. Low. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 181–210.
- [29] Katayama, S. (2013). Introduction: fundamentals of laser welding. In *Handbook of laser welding technologies*. Woodhead Publishing.
- [30] Hecht, J. (2004). *City of light: the story of fiber optics*. Oxford University Press on Demand.
- [31] Stoker, M. R. (2005). Basic principles of lasers. *Anaesthesia & intensive care medicine*, 6(12), 402-404.
- [32] Katayama, S., Yohei, A., Mizutani, M., & Kawahito, Y. (2011). Development of deep penetration welding technology with high brightness laser under vacuum. *Physics Procedia*, 12, 75-80.
- [33] Katayama S (2010), 'Laser welding of dissimilar materials', *The Review of Laser Engineering*, 38(8) 594–602 (in Japanese).
- [34] Katayama, S., Kawaguchi, S., Mizutani, M., Kawahito, Y., & Tarui, T. (2009). Welding phenomena and in-process monitoring in high-power YAG laser welding of aluminium alloy. *Welding International*, 23(10), 753-762.
- [35] Kawahito, Y., Kito, M., & Katayama, S. (2007). In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(9), 2972.
- [36] Mahrle, A., & Beyer, E. (2007). Mathematical description of the transient energy deposition in laser materials processing with forced beam oscillation. In *Proceedings (CD-*

ROM) of the 20th Meeting on Mathematical Modelling of Materials Processing with Lasers M4PL20, Igls/Innsbruck, Austria.

- [37] Migliore, L. R. (1998). Heat treating with lasers. *Advanced materials & processes*, 154(2), H25-H25.
- [38] Rubben, K., Mohrbacher, H., & Leirman, E. (1997, August). Advantages of using an oscillating laser beam for the production of tailored blanks. In *Lasers in Material Processing* (Vol. 3097, pp. 228-241). International Society for Optics and Photonics.
- [39] ASM International. Handbook Committee. Knovel (Firm) (1993) *ASM handbook*. Volume 6, Welding, brazing, and soldering
- [40] Chern, T. S., Tseng, K. H., & Tsai, H. L. (2011). Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds. *Materials & Design*, 32(1), 255-263.
- [41] Dong, H. (Ed.). (2010). Surface engineering of light alloys: Aluminium, magnesium and titanium alloys.
- [42] Kuk, J. M., Jang, K. C., Lee, D. G., & Kim, I. S. (2004). Effects of temperature and shielding gas mixture on fatigue life of 5083 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 155, 1408-1414.
- [43] Katayama S (2005) 'Formation mechanisms and preventive procedures of laser welding defects', 2004 LMP Symposium on High Quality and New Trend of Laser Welding, Laser Materials Processing (LMP) Research Committee of Japan Welding Engineering Society (JWES), January, 8-1–8-15 (in Japanese).
- [44] Sencer, B. H., Was, G. S., Sagisaka, M., Isobe, Y., Bond, G. M., & Garner, F. A. (2003). Proton irradiation emulation of PWR neutron damage microstructures in solution annealed 304 and cold-worked 316 stainless steels. *Journal of nuclear materials*, 323(1), 18-28.
- [45] Ma, J. C., Yang, Y. S., Tong, W. H., Fang, Y., Yu, Y., & Hu, Z. Q. (2007). Microstructural evolution in AISI 304 stainless steel during directional solidification and subsequent solid-state transformation. *Materials Science and Engineering: A*, 444(1-2), 64-68.
- [46] Saha, S., Mukherjee, M., & Pal, T. K. (2015). Microstructure, texture, and mechanical property analysis of gas metal arc welded AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(3), 1125-1139.
- [47] Yan, J., Gao, M., & Zeng, X. (2010). Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(4), 512-517.
- [48] Shen, Y. F., Li, X. X., Sun, X., Wang, Y. D., & Zuo, L. (2012). Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 552, 514-522.
- [49] Fu, J. W., Yang, Y. S., Guo, J. J., & Tong, W. H. (2008). Effect of cooling rate on solidification microstructures in AISI 304 stainless steel. *Materials Science and Technology*, 24(8), 941-944.
- [50] Katayama, S., & Mizutani, M. (2002). Laser Weldability of Aluminum Alloys (Physics, Processes, Instruments & Measurements). *Transactions of JWRI*, 31(2), 147-155.
- [51] Costa, A. P., Quintino, L., & Greitmann, M. (2003). Laser beam welding hard metals to steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(2), 163-173.

- [52] Balasubramanian, K. R., Buvanashakaran, G., & Sankaranarayanan, K. (2007). Mathematical and ANN modeling of Nd: YAG laser welding of thin SS sheets. *Journal Manufacturing Engineering*, 6(2), 56-60.
- [53] Padmanaban, G., & Balasubramanian, V. (2010). Optimization of laser beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy. *Optics & Laser Technology*, 42(8), 1253-1260.
- [54] Dhavalkumar K. and Patel D M. (2013). An experimental investigation and prediction of laser welding process. *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology* 1(4).
- [55] Jasbir, S. A., & Arora, J. S. Introduction to Optimum Design,(1989).
- [56] Aoki, M. (1971). *Introduction to optimization techniques. Fundamentals and applications of nonlinear programming*. CALIFORNIA UNIV LOS ANGELES DEPT OF SYSTEM SCIENCES.
- [57] Zhang, Y. M., Kovacevic, R., & Li, L. (1996). Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(7), 799-816.
- [58] Bull, C. E., Stacey, K. A., & Calcraft, R. (1993). On-line weld monitoring using ultrasonics. *British Journal of Non-Destructive Testing*, 35(2), 57-64.
- [59] Tarn, Y. S., & Yang, W. H. (1998). Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method. *The International Journal of advanced manufacturing technology*, 14(8), 549-554.
- [60] Huang, Q., Hagstrom, J., Skoog, H., & Kullberg, G. (1991). Effect of CO sub 2 Laser Parameter Variations on Sheet Metal Welding. *International Journal for the Joining of Materials*, 3(3), 79-88.
- [61] Boyce, B. L., Reu, P. L., & Robino, C. V. (2006). The constitutive behavior of laser welds in 304L stainless steel determined by digital image correlation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(8), 2481-2492.
- [62] Zervas, M. N., & Codemard, C. A. (2014). High power fiber lasers: a review. *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, 20(5), 219-241.
- [63] Overton, G. A. I. L., Noguee, A. L. L. E. N., & Holton, C. O. N. A. R. D. (2014). Laser Marketplace 2014: Lasers forge 21st century innovations. *Laser Focus World*, 5.
- [64] Bachmann, M., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2016). Welding with high-power lasers: Trends and developments. *Physics Procedia*, 83, 15-25.
- [65] Martukanitz, R. P., & Tressler, L. F. (2006). Technology report-Mixing it up-Laser stir welding shows promise for the joining of aluminum alloys. *Industrial Laser Solutions-for Manufacturing*, 21(3), 25-30.
- [66] Spöttl, M., & Mohrbacher, H. (2014). Laser-based manufacturing concepts for efficient production of tailor welded sheet metals. *Advances in manufacturing*, 2(3), 193-202.
- [67] Schweier, M., Heins, J. F., Haubold, M. W., & Zaeh, M. F. (2013). Spatter formation in laser welding with beam oscillation. *Physics Procedia*, 41, 20-30.
- [68] Kuryntsev, S. V., & Gilmutdinov, A. K. (2015). The effect of laser beam wobbling mode in welding process for structural steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9), 1683-1691.

- [69] Kraetzsch, M., Standfuss, J., Klotzbach, A., Kaspar, J., Brenner, B., & Beyer, E. (2011, October). Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 2011, No. 1, pp. 169-178). Laser Institute of America.
- [70] Müller, A., Goecke, S. F., Sievi, P., Albert, F., & Rethmeier, M. (2014). Laser beam oscillation strategies for fillet welds in lap joints. *Physics Procedia*, 56, 458-466.
- [71] Hao, K., Li, G., Gao, M., & Zeng, X. (2015). Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 77-83.

CHAPITRE 1

OPTIMISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ACIER INOXYDABLE 304L SOUDÉ PAR LASER À L'AIDE DE LA MÉTHODE TAGUCHI DANS LA CONFIGURATION DES JOINTS EN CHEVAUCHEMENT

1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

Cette étude se concentre principalement sur l'optimisation de la géométrie du cordon de soudure et de ses caractéristiques microstructurelles, qui affectent les propriétés mécaniques des composants soudés d'un échantillon de 1,8 mm d'épaisseur d'acier inoxydable austénitique de type 304L. Elle nécessite donc d'étudier une gamme de paramètres de soudage sur la qualité de soudage de plaques soudées en AISI 304L formant des joints à recouvrement.

Dans le cadre de ce projet, des études sont menées sur un système de soudage laser à fibre à onde continue (CW) après des expérimentations préliminaires pour comprendre les paramètres critiques associés au soudage laser de l'AISI 304L. L'étude de l'effet des paramètres de soudage basée sur l'analyse des expériences de données Taguchi pour les tests de traction et de microdureté des échantillons soudés a été établie à l'aide du logiciel statistique Minitab v18. L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour analyser l'effet des différents paramètres sur les réponses.

Des diagrammes de contour ont été développés pour découvrir les effets combinés des paramètres d'entrée sur les réponses. Ces combinaisons de paramètres de soudage ont fourni les meilleures propriétés mécaniques pour les échantillons soudés et trouvent un accord raisonnable avec l'approche de modélisation Taguchi.

Mots clés: AISI 304L, soudage au laser fibre, microstructure, propriétés mécaniques, configuration de chevauchement, méthode Taguchi, méthode ANOVA.

Ce premier article, intitulé « Optimisation Des Propriétés Mécaniques De L'acier Inoxydable 304L Soudé Par Laser À L'aide De La Méthode Taguchi Dans La Configuration Des Joints En Chevauchement », a été co-écrit par moi-même ainsi que par le professeur Nouredine Barka. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2021 par le *International Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail a été l'essentiel de la recherche sur l'état de l'art, le développement de la méthode, la réalisation des tests de performance et la rédaction de l'article. Le professeur Barka, le deuxième auteur, a fourni l'idée originale. Il a également participé à la recherche sur l'état de l'art, au développement de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article.

1.2 OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES FOR 304L STAINLESS STEEL WELDED BY LASER USING TAGUCHI METHOD IN OVERLAP JOINT CONFIGURATION.

1.2.1 ABSTRACT

This study focuses mainly on optimizing the weld bead geometry and its microstructural characteristics, which affect the mechanical properties of the welded components of a 1.8-mm-thick sample of austenitic stainless-steel type 304L, therefore it requires to study a range of welding parameters on the weld quality of AISI 304L welded plates forming overlap joints.

As part of this project, studies are being conducted on a continuous wave (CW) fiber laser welding system after preliminary experimentations to understand the critical parameters associated with laser welding of AISI 304L. The effecting of welding parameters study based on the analysis of Taguchi data experiments for tensile and microhardness tests of the welded samples were established using the statistical software Minitab v18. Analysis of variance (ANOVA) has been used to analyze the effect of different parameters on the responses.

Contour plots have been developed to find out the combined effects of input parameters on responses. These combinations of welding parameters provided the best mechanical properties for the welded samples and find a reasonable agreement with the Taguchi modeling approach.

Key Words: AISI 304L, Fiber Laser Welding, Microstructure, Mechanical Properties, Overlap Configuration, Taguchi Method, ANOVA Method.

1.2.2 INTRODUCTION

Laser beam welding (LBW) is a welding technique used to join pieces of metal or thermoplastics through the use of a laser. The laser beam provides a concentrated heat source, allowing for narrow, deep welds and high welding rates. The process is frequently used in high-volume applications using automation, as in the automotive industry. It is based on keyhole or penetration mode welding. This technique uses one of two types of welding equipment: a solid-state welder and a gas laser welder. These machines create a precise bond by emitting a dense beam of photons that can work with thin and thick pieces of metal. This type of welder is popular in the production of airplanes, cars, and spacecraft, but has some drawbacks that prevent him from working in all industries. Welding with laser beams works with a dense beam of photons that every type of machine produces. This ray of light quickly heats metals, so that the two pieces' merge into one unit. The light beam is very small and concentrated, so the metal solder also cools very quickly. Laser beam welding machines can emit a continuous beam to work with thicker metals, or short-pulsed bursts to bond thinner materials. LBW is a versatile process, capable of welding carbon steels, HSLA steels, stainless steel, aluminum, and titanium. Due to high cooling rates,

cracking is a concern when welding high-carbon steels. The weld quality is high, similar to that of electron beam welding. The speed of welding is proportional to the amount of power supplied but also depends on the type and thickness of the workpieces. LBW is particularly dominant in the automotive industry [1,2]. The advantages and limitations of laser welding depend on focused beam properties. The high-power density permits welding based on the keyhole principle, and reduced energy transfer to the material produces a very narrow heat-affected zone (HAZ) with low residual stress and small distortions. The high cooling rate favors the formation of a fine microstructure, and this normally imparts improved mechanical properties [3]. Welding quality is strongly characterized by the weld bead geometry. Due to that, the weld bead geometry plays an important role in determining the mechanical properties of the welded joints [4,5]. Design of experiment (DOE) and statistical techniques are widely used to optimize process parameters [6].

Boyce et al. [7] had proven that the mechanical performance of welded components is closely linked to the material properties in the fusion zone or heat-affected zone of the weldment. To assess failure, such as by finite-element methods, researchers and engineers require an accurate description of the constitutive stress-strain response in the weldment material. Yet, the properties in the fusion and heat-affected zone are not always easy to quantify. For large-scale welds, conventional, [8,9] sub-size, [10], or miniature [11] tensile bars can be extracted directly from the weld metal for subsequent tensile testing. This provides the most direct method for measuring the mechanical properties of the weld material, but requires sufficiently large weldments, and assumes a homogeneous material property across the dimensions of the tensile bar [7]. K. R. Balasubramanian et al. [12] proved that the laser welding process provides great potential for the new product design and it has some attractive features such as high weld strength to weld size ratio, reliability, and minimal heat-affected zone (HAZ), which is suitable for welding of heat-sensitive materials. When developing the welding procedure for a specific application, each of these parameters must be characterized and fully specified. S.A. Tsirkas et al. [13] provided a numerical simulation of the welding process that showed the physical value of some complex phenomena and used for optimizing the welding parameters. [13] Balasubramanian, K.R et al. [14] showed that the weld bead dimensions produced by laser welding depend on various parameters such as beam power, welding speed, beam angle gas flow rate, focal length, and spot diameter [14].

Several researchers have previously studied the mechanical properties of austenitic stainless-steel weldments. Brooks et al. [10] investigated the tensile properties of gas-tungsten arc and electron beam welds in several compositions of free-machining AISI 303 stainless steel by extracting tensile samples from the fusion zone. They showed that yield and ultimate strengths were affected by ferrite number, whereas ductility, as measured by reduction in area, was dramatically reduced with increasing sulfur content. Compared to typical solution-treated 303 alloy base metal properties, [15] these weld alloys showed 5 to 30 pct increases in strength and 0 to 50 pct reduction in ductility, depending on the composition. The alloys with sulfur content, 0.1 wt pct had mechanical properties that would meet the ASTM minimum ductility specification (50 pct RA) for solution-treated AISI 303 round bar base metal, [16] although they were somewhat stronger than typical solution-treated material. Also, in austenitic stainless steels, the presence of solidification cracking [10] or micro-fissures, [8] have been shown to have slightly lower strength

values and a deleterious effect on the ductility, reducing elongation by 50 pct or more. Chen et al. [17], have studied the influence of processing parameters on the characteristic of stainless steel/copper laser welding. C.H. Ng et al. [18] have made an attempt to improve the quality of the weldment between nickel-titanium (NiTi) and AISI 316L stainless steel wires. Tan and Shin [19] have studied the multi-scale modeling of solidification and microstructure development in laser keyhole welding process for austenitic stainless steel. The model predictions are validated with the experimental results and the effects of the welding parameters are analyzed based on numerical and experimental results. Optimization of CO₂ laser welding of DP/TRIP steel sheets using a statistical approach has been conducted by U. Reisgen et al. [20].

P. Sathiya et al. [21] have shown that laser welding input parameters play a very important role in determining the quality of a weld joint. Joint quality can be defined in terms of properties such as weld bead geometry, mechanical properties, and deformation. Therefore, the mechanical properties must be controlled to achieve good welded joints. In this study, weld bead geometry, such as penetration depth (DP), bead width (BW), and tensile strength (TS) of AISI 904L super austenitic stainless-steel laser welded joints, has been studied. A full factorial design was used to realize the experimental design. The MATLAB program was developed in the MATLAB software to establish the relationships between the laser welding input parameters, such as beam power, travel speed, and focal position, and the three responses DP, BW, and TS in three different shielding gases (Azote). The established models were used to optimize the process parameters using the genetic algorithm (GA). The developed ANN model is suitably integrated with optimization algorithms such as (GA) to optimize welding parameters. To optimize the welding parameters of GA, laser welding joints have been processed. The seals are of better quality. The good agreement between theoretical predictions (GA) and the tensile strength, penetration depth, and bead width obtained experimentally confirms the applicability of these evolutionary computational techniques for the optimization of process parameters in the process of welding [21]. Zhou et al. [22] have developed a mathematical model to analyze the heat transfer, fluid flow, and keyhole dynamics during pulsed keyhole laser welding. A numerical and experimental investigation of laser welding of titanium alloy (Ti6Al4V) for modeling the temperature distribution to predict the heat-affected zone, depth, and width of the molten pool has been done by M. Akbari et al. [23]. Hauser and Van Echo [24] evaluated the tensile and stress rupture response of E308 arc welds with a range of ferrite contents. Increasing ferrite content was generally observed to result in increases in room-temperature strength and decreases in rupture life.

Another study for Lifang Mei et al. [25] presented some useful results on deep penetration laser welding of high strength galvanized steel sheets, carried out by a laser unit with a maximum output power of 1.5 kW. The 1.5mm thick high-strength galvanized steel automotive steel parts were butt welded with argon as a shielding gas. The effects of factors such as laser power, welding speed, focal position, shielding gas, and zinc vaporization on weld quality are examined. With the optimized processing parameters and the appropriate shielding gas used in both directions, most defects, such as pores, cracks, and softening in HAZ, can be avoided in laser weld joints. The heat and recrystallization of the laser change the microstructure, the hardness distribution, and the distribution of the elements in the solder joints. In order to determine the mechanical properties of the solder joints, the static tensile strength was tested. Experimental results indicated that the

strength and micro-hardness of the solder joints were superior to those of the parent metal. The deep perforation performance obtained by adopting Ar as the shielding gas is better than that obtained by adopting N₂ as the shielding gas. Meanwhile, the effect of zinc vaporization on solder joints can be effectively controlled by means of blow-side shielding gas. The experimental results indicate that the promising welding quality can be obtained under the chosen condition of taking Ar as a shielding gas, a laser power P of 1300 W, a defocus value of 0.4 mm, a welding speed of 1, 0 m / min, a blown coaxial shielding gas flow q of 2.5 m³ / h, the flow of side-blown shield gas q of 1.8 m³ / h and side blowing angle α of 301[25].

This research focuses on the development of a predictive approach for the mechanical properties of an AISI 304L stainless-steel plate specimen with dimensions of (117.5×21×1.8) mm, in overlap configuration and without the use of a shielding gas during the welding process, and with the assumption that the gap distance between the welded parts is equal zero. Laser power and welding speed are used as the foundation for the proposed studies since they are the most important factors on the quality of laser welds. The weld characteristics that need to be assessed include bead width, penetration depth, microstructure, ultimate tensile strength/force, and microhardness. The identification of the most significant factors in order to construct accurate and robust prediction models is also a goal of determining the impacts between the parameters and the weld quality. On AISI 304L plates, the experiments are conducted. The study makes use of a fibre laser that produces a beam with a wavelength of 1070 nm and a maximum power of 3 kW. To get the best results with the fewest trials, an experimental design based on the Taguchi technique is selected. The laser's power, welding speed, and beam diameter are all taken into consideration.

The width and depth of the weld bead, the microhardness, and the final tensile force are all quality characteristics to consider. After welding, samples are subjected to a typical metallographic technique that includes cutting, polishing, etching, and microscopic examination. The findings are subjected to an ANOVA statistical analysis in order to determine the impact of the factors examined and their contributions to the variation of the different attributes. Laser welding experiments are performed on AISI 304L grade samples in order to assess the influence of various input parameters on the mechanical and microstructural properties of 304L, i.e., ultimate tensile force, microhardness, and the microstructure of the welded samples.

1.2.3 EXPERIMENTAL PROCEDURE

1.2.3.1 Experiment Setup

In this project, two 304L stainless steel samples, with dimensions of 117.5 mm × 21 mm × 1.8 mm, are used as work pieces as shown in [Figure 1.1](#), and [Figure 1.2](#) shows a welded sample in a lap joint configuration. The chemical composition and the chemical mechanical properties of the base metal shown in [Table 1.1](#) and [1.2](#) respectively were used in this study [26,27].

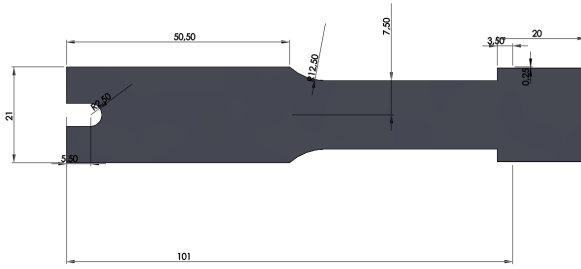


Figure 1.1 Laser welding sample (before laser welding).

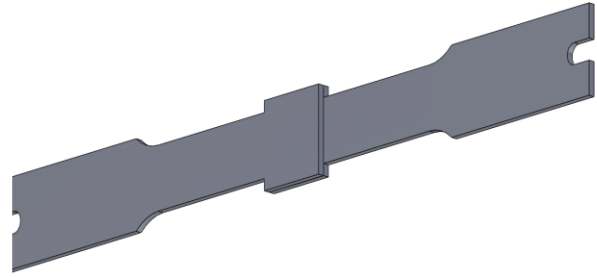


Figure 1.2 Laser welded sample (after laser welding).

Table 1.1 Chemical composition of AISI 304L plates (wt%) [26].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.03%	0.75%	2%	0.045%	0.03%	20%	12%	0.1%	65%

Table 1.2 Mechanical properties of AISI 304L plates [27].

Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation %	Hardness (HV)
210 MPa	564 MPa	58%	161 HV

In this work, AISI 304L was used as the substrate material to investigate the effects of welding parameters on its welding quality. This alloy can be welded even in severe corrosive conditions. In many cases, it eliminates the necessity of annealing weldments except for applications specifying stress relief. It has slightly lower mechanical properties than type 304, and the carbon is kept to 0.03% as maximum. The type 304L is more expensive, and it is considered as weldable stainless steel. Since it does not require post-weld annealing. Therefore, it is extensively used in heavy gauge components. Carbon included in this grade of stainless steel imparts great physical strength at high temperatures [28].

A 3-kW continuous fiber industrial laser system (IPG YLS-30000) as shown in Figure 1.3, with wavelength of 1.070 nm is used to perform the welding tests for this project with no shielding gas. The experimental set-up includes the fiber laser and FANUC M-710iC a high-precision arm type 6-axis robot. The two metal samples are clamped against each other during the laser welding process and it is assumed that a zero gap is obtained. A robotic control panel is used to control the weld path and implement the weld procedure. Welded joints were visually inspected and samples were sectioned transverse to the welding direction, mechanically polished and etched. The samples were prepared for the metallographic examinations by polishing successively in emery papers to remove the scratches. Marble (HCl (conc.) 50 ml + saturated solution CuSO₄, in H₂O₂ 25 ml) acid's reagent was used for revealing weld microstructure. Furthermore, a micro-hardness survey has been made on flat metallographic specimens across the joints and top to bottom in the weld using Vickers's micro-hardness testing machine (Make: CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0) optical microscope at 50 gf load with 0.29 μm dot spacing along the vertical and horizontal

direction. CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0 was used too to study the microstructure dimensions in the fusion and heat-affected zones of the welds.



Figure 1.3 Continuous fiber industrial laser system (IPG YLS-30000).

1.2.3.2 Design of Experiments (DOE)

An experimental design based on the Taguchi technique was used to acquire the data. The experiments were carried out on the basis of three factors, three levels. The experimental procedure includes a series of laser welding tests on AISI 304L stainless steel samples with various combinations of process parameters such as welding power, welding speed, and focal diameter.

The experimental procedure consists of a series of tests aimed at developing and evaluating the knowledge base on laser welding of AISI 304L samples. Taguchi's L_9 (3^3) orthogonal array is used in this project, which allows for the execution of nine experiments. Welding Parameters for each condition and response factors are listed in **Table 1.3**, while the used design of experiments (DOE) is listed in **Table 1.4**.

Table 1.3 Welding Parameters for each condition and response factors.

Symbol	Parameters	Level (1)	Level (2)	Level (3)
P	Welding Power (W)	2200	2450	2700
S	Welding Speed (mm / s)	15	20	25
D	Focal Diameter (mm)	0.40	0.45	0.50

Table 1.4 Experimental layout (L_9) showing different welding parameters.

Experimental no.	Factor (P)	Factor (S)	Factor (D)
	Welding Power (W)	Welding Speed (mm / s)	Focal Diameter (mm)
1	2200	15	0.40
2	2200	20	0.45
3	2200	25	0.50
4	2450	15	0.45
5	2450	20	0.50
6	2450	25	0.40
7	2700	15	0.50
8	2700	20	0.40
9	2700	25	0.45

DOE is a technique to define and invest all possible combinations in an experiment involving several factors and to identify the best combination. In this, different factors and their levels are identified. The design of the experiments (DOE) is also useful for combining the factors at appropriate levels, each with the respective acceptable range, to produce the best results while having minimal variation around the optimal results, so that better quality products can be produced, quickly and at a minimal cost.

The Taguchi method achieves the marriage of design of experiments with the optimization of control parameters in order to obtain the best results. Orthogonal Arrays (OA) provide a well-balanced set of experiments (minimum) and Taguchi's signal-to-noise (S / N) ratios, desired output logarithmic functions, serve as objective functions in optimization, help to data analysis and the signal to noise ratio (S / N) for each level is based on the analysis of the (S / N) ratio. Based on the tensile force of the solder joint (bigger, better), a higher S / N ratio produces a better-quality value. The standard (S / N) ratio formula for this type of response is: The S / N ratio η is defined as $\eta = -10 \log (\text{M.S.D.})$ Where M.S.D. is the mean square deviation for the output characteristic [29].

$$n_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_{ij}^2} \right] \quad (1)$$

Where (i) is the number of a trial; (Y_{ij}) is the quality of (i ^ th) process and (j ^ th) experience; (n) is the total number of experiments. Here in the present study, our goal is to obtain the ultimate tensile force and the bead width of the welded joint. Consequently, the (larger is better) the criterion used to optimize the parameters for the ultimate tensile force and the (smaller is better) the criterion used for the bead width of the welded joints. All the experiments were carried out on MTS 810 Material testing system. During the test, the sample is pulled from each end with increasing the load. When a certain load is reached (load at which the sample yield), the sample begins to fail and then break.

1.2.4 MICROSTRUCTURE, WELD PENETRATION, AND MICROHARDNESS TEST RESULTS

The profiles for the penetration depth and bead width produced by the nine experiments were captured by an optical microscope and depicted in [Table 1.5](#) and [1.6](#) and respectively.

In [Figure 1.4](#), the results show that at high speed (25 mm/sec) the weld beads were unstable meandering ones with spatters at all laser powers range, this could be because at higher welding speed the molten pool became shorter and the keyhole is unstable, so, the spattering became more severe, while at low speed (15 mm/sec) full penetration welds and stable beads were obtained [\[30\]](#).

[Table 1.5](#) shows the effect of welding parameters on the weld penetration. It clearly shows from the results that the welding speed has the main effect on the welding penetration as shown in specimen no. 5 and specimen no. 3, as a consequence, increasing the speed leads to deeper penetration, and vice versa. The focus diameter is the second influencing parameter; as can see from specimens no. 2 and no. 5 that increasing the focal diameter generates a shallower penetration, which may not accomplish the welding process perfectly. And the welding power takes the less effecting parameter on the welding penetration, unlike the ultimate tensile force. [Table 1.6](#) shows the bead width measurements in (μm).

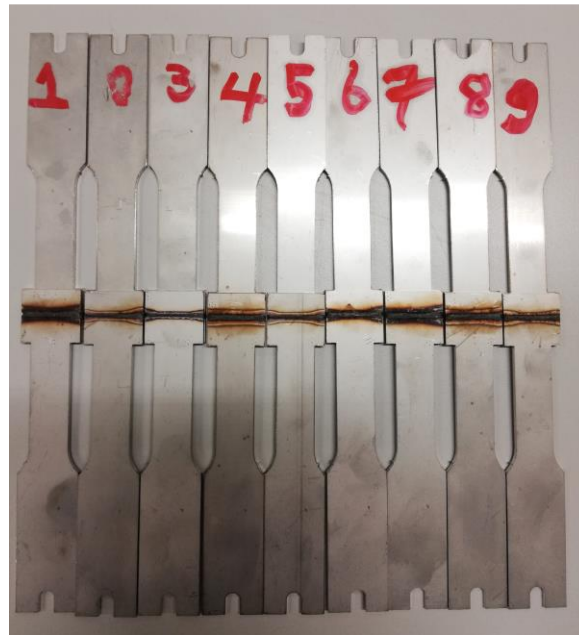


Figure 1.4 *Weld bead appearances under different welding conditions.*

Table 1.5 *Cross-sectional metallography of the laser-welded structures.*

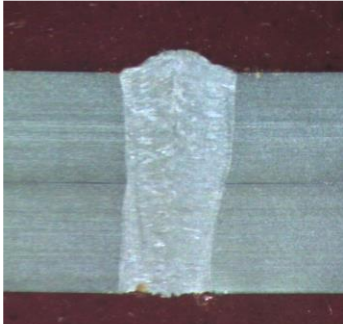
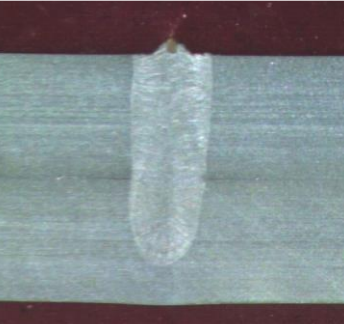
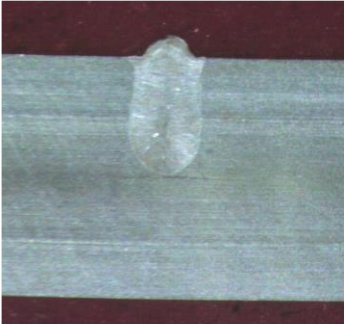
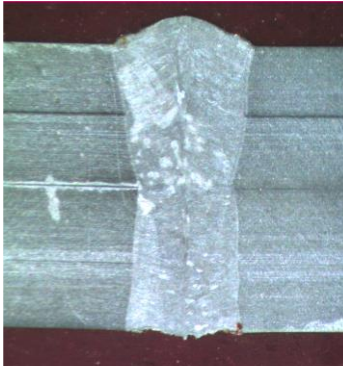

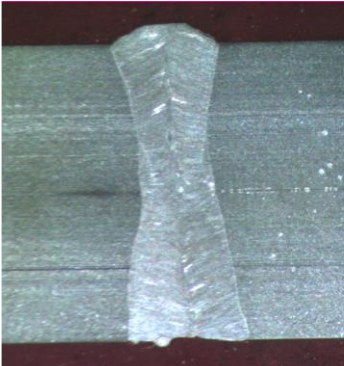
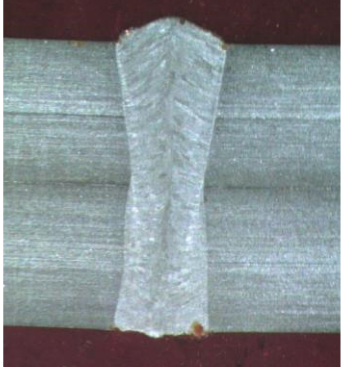
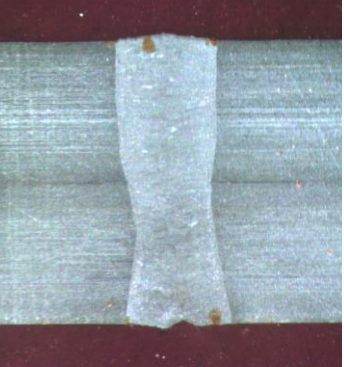
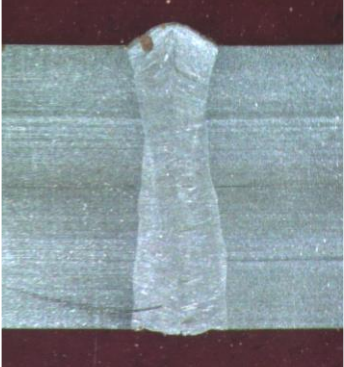
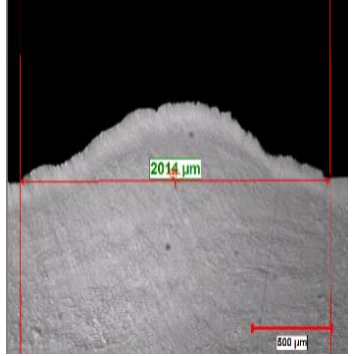
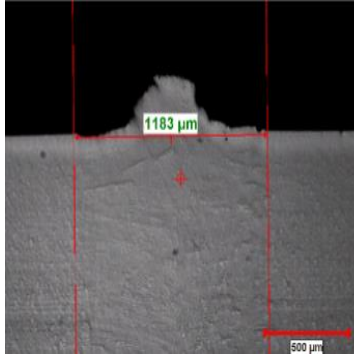
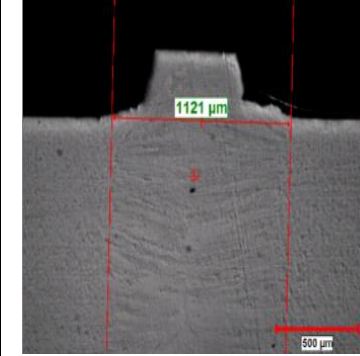
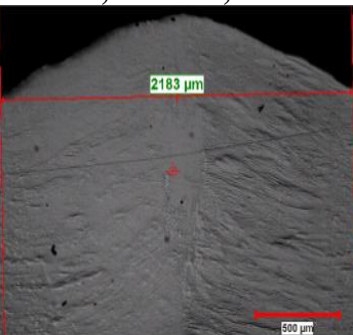
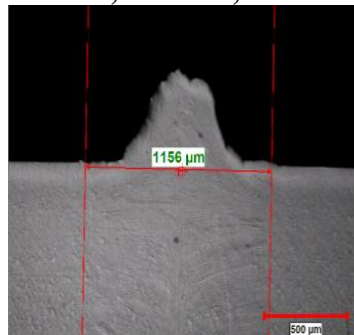
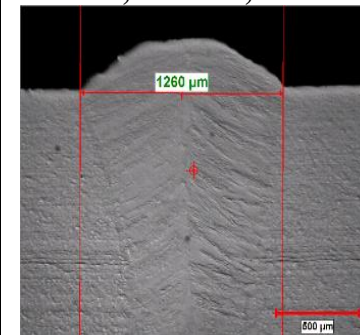
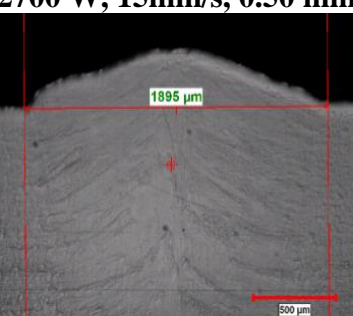
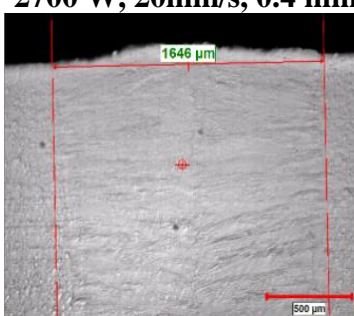
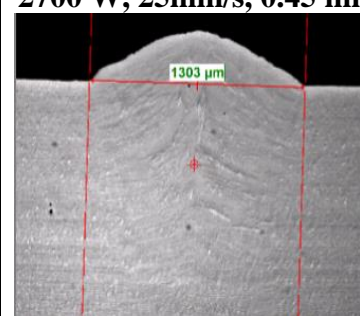
<p>2200 W, 15mm/s, 0.40 mm</p> 	<p>2200 W, 20 mm/s, 0.45 mm</p> 	<p>2200 W, 25mm/s, 0.50 mm</p> 
<p>2450 W, 15mm/s, 0.45 mm</p> 	<p>2450 W, 20mm/s, 0.50 mm</p> 	<p>2450 W, 25mm/s, 0.40 mm</p> 
<p>2700 W, 15mm/s, 0.50 mm</p> 	<p>2700 W, 20mm/s, 0.4 mm</p> 	<p>2700 W, 25mm/s, 0.45 mm</p> 

Table 1.6 Bead Width Measurements in (μm).

<p>2200 W, 15mm/s, 0.40 mm</p> 	<p>2200 W, 20 mm/s, 0.45 mm</p> 	<p>2200 W, 25mm/s, 0.50 mm</p> 
<p>2450 W, 15mm/s, 0.45 mm</p> 	<p>2450 W, 20mm/s, 0.50 mm</p> 	<p>2450 W, 25mm/s, 0.40 mm</p> 
<p>2700 W, 15mm/s, 0.50 mm</p> 	<p>2700 W, 20mm/s, 0.4 mm</p> 	<p>2700 W, 25mm/s, 0.45 mm</p> 

Figures 1.5(a)–1.5(c) show the optical micrographs of the welded samples of AISI 304L after etching as per ASTM standard test. In **Figure 1.5(a)** which represents the HAZ, a single-phase austenite structure observed and no trace of secondary phases like carbides was found. **Figure 1.5(b)** shows the fusion line (between the HAZ and the fusion zone) is characterized by the presence of lightly etched martensite which is in the form of a layer or band and the overlay consists of austenite and ferrite. There are significant differences between the morphology of the fusion line and the HAZ, which is in accordance with the available literature [31]. The morphology of the area between 304L stainless steel and the weld is different. The areas of the smooth transition of weld to base material were observed. **Figure 1.5(c)** obtained the weld zone of AISI 304L which possesses an austenitic matrix with oriented colonies of δ -ferrite dendrites (both vermicular and lathy). The increase in delta ferrite in the weldment will improve the mechanical integrity of the welded joint [32].

(a)



(b)



(c)



Figure 1.5 Optical micrographs of welded AISI 304L showing: (a) HAZ, (b) Fusion Line, and (c) Weld Metal.

Micro-hardness profiles across the fusion zone (horizontal direction) of AISI 304L welded plates are shown in **Figure 1.6**. Measurements were carried out at many data points to obtain the value of microhardness on the Weld Zone (WZ), Heat Affected Zone (HAZ), and Base Metal (BM). The microhardness of the welded samples for the fusion zone are higher than that of the AISI 304L base metal (~ 159 HV). HAZ and WZ possess a higher microhardness than the BM. The variation in hardness values among the weld metals can be explained by the relative microstructural differences. It has been analyzed that the highest microhardness was found on the WZ.

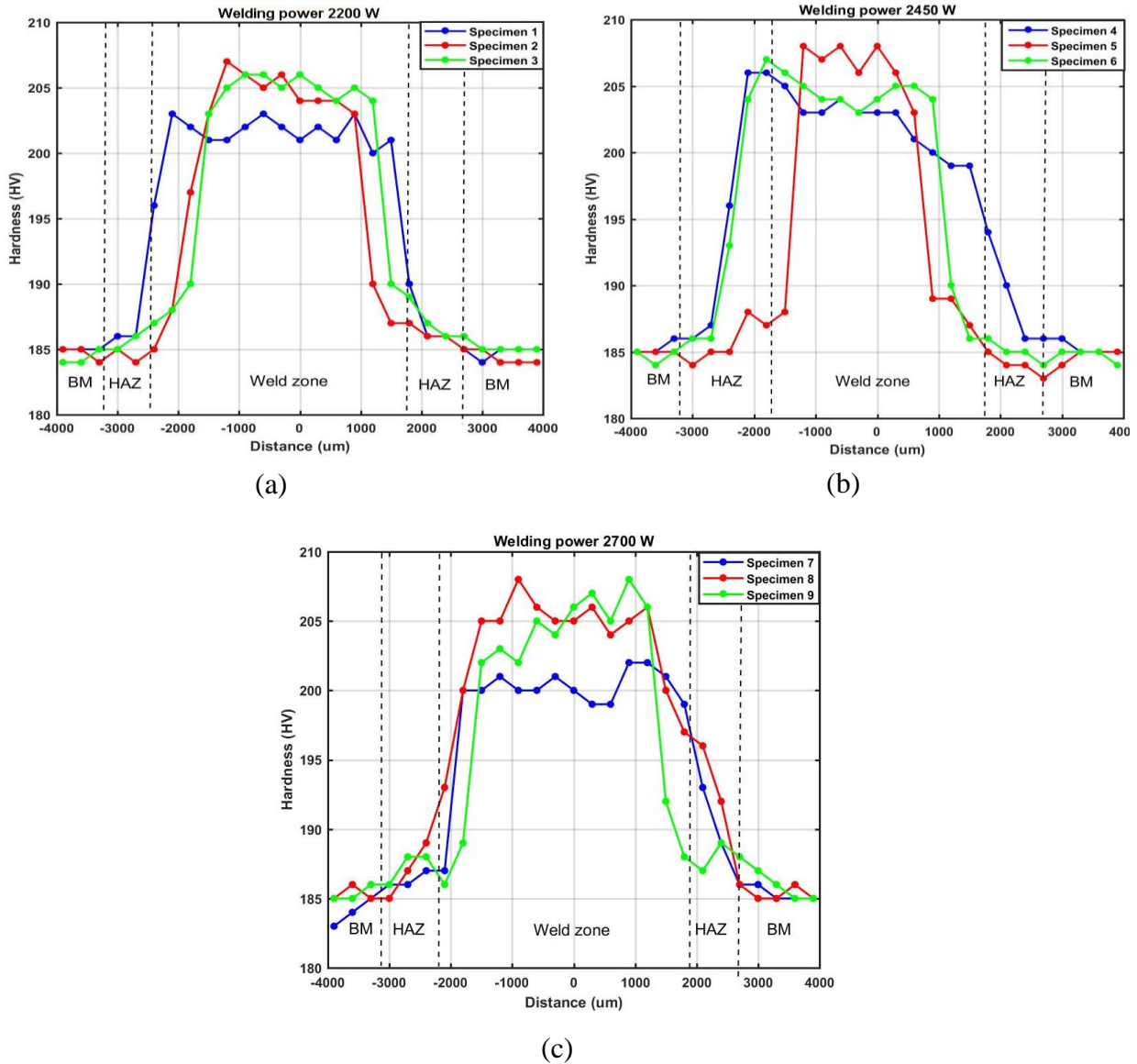


Figure 1.6 Microhardness test configuration; Microhardness plots of welded joints across the fusion zone.

1.2.5 TENSILE TEST RESULTS

From the Force-Displacement curves for the welded specimens as shown in **Figure 1.7**, which indicates the specimens with the highest and the lowest UTS for specimens No.7 and No.3 respectively. The failure region in which each sample failed was recorded and all of this information is shown in **Table 1.7**.

In order to perform the tensile test for the welded specimens, the outer middle flange had been cut as shown in **Figure 1.8**. The measured response is listed in **Table 1.7**, Minitab v18 software has been applied for analyzing the measured response and determining the mathematical model with the best fit. The fitted quadratic polynomial model for response is statistically significant for the prediction within the working range of welding parameters. Therefore, they will be used for further analysis. The maximum and minimum ultimate tensile force are observed for specimen no. 7 ($P = 2700$ W, $S = 15$ mm/s, and $D = 0.50$ mm) and sample no. 3 ($P = 2200$ W, $S = 25$ mm/s and $D = 0.50$ mm) respectively.

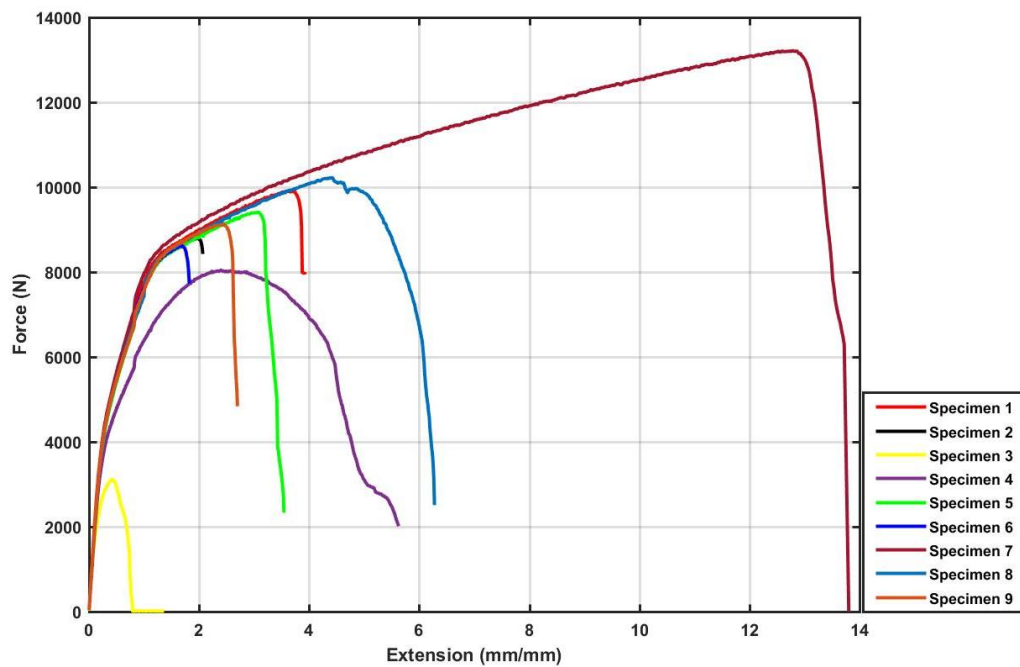


Figure 1.7 Force-Displacement Curves for the nine welded specimens.

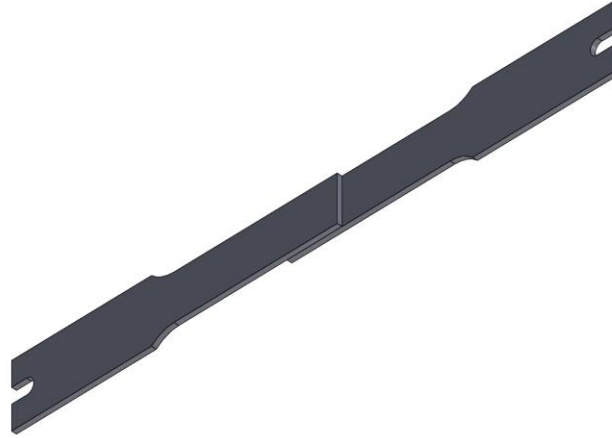


Figure 1.8 *Welded tensile test specimen.*

Table 1.7 *Design of experiment for welding factors and measured experimental results.*

Experimental no.	P (W)	S (mm/s)	D (mm)	Force (N)	Fracture Point
1	2200	15	0.40	9917.067	Weld metal
2	2200	20	0.45	8818.549	Weld metal
3	2200	25	0.50	3122.29	Weld metal
4	2450	15	0.45	8050.629	Weld metal
5	2450	20	0.50	9416.390	Weld metal
6	2450	25	0.40	8615.381	Weld metal
7	2700	15	0.50	13219.056	Weld metal
8	2700	20	0.40	10226.428	Weld metal
9	2700	25	0.45	9131.266	Weld metal

1.2.6 STATISTICAL ANALYSIS

1.2.6.1 Bead Width Results

The adequacy of the developed model is tested using the sequential f-test, and analysis-of-variance (ANOVA) technique using the Minitab v18 software to obtain the best fit model. The ANOVA tables also show the other adequacy measure R^2 , adjusted R^2 , and predicted R^2 for bead width is given in [Table 1.8](#). The associated p-value of less than 0.05 for the model (i.e., p-value < 0.05, at 95% confidence level) indicates that the model terms are statistically significant. The ANOVA indicates that for the bead width model, the laser power (P), welding speed (S), Focal Diameter (D), and the quadratic effect of the welding speed (S^2) are the significant model terms. The other terms are not significant and thus, eliminated by the step-by-step elimination process to improve model adequacy [6].

ANOVA is a statistical method that may help assess the effect and contribution of each of these factors on bead width values by revealing all essential information about process parameters. The ANOVA was run in a step-by-step mode, which automatically removes non-significant factors. The residual is small, accounting for less than 10% of the variance in bead width, according to the analysis. Welding speed is the factor that has the greatest impact on bead width, accounting for approximately 71% of the total. Between 3% and 7%, the welding power and focal diameter have a modest impact on the bead width. Furthermore, this little contribution is not reflected in the bead width. ANOVA tables have also been used to assess the relevance and impact of design factors on each process's feature, showing how bead width changes as a function of design parameter modification. The error's contribution percentage is small, indicating that no significant element was neglected out of the experimental design.

The ANOVA result for reduced quadratic model is shown in **Table 1.8**. The high F-values implies that the term is significant. Values of “prob > F” less than 0.05 indicate model terms are significant. The R^2 value of 94.68%, is the percentage of variation in the response that is explained by the model and it's used to determine how well the model fits the data. The higher the R^2 value, the better the model fits the data and it's always between 0% and 100%. Adjusted R^2 of 89.35%, is the percentage of the variation in the response that is explained by the model, adjusted for the number of predictors in the model relative to the number of observations and it's used to compare models that have different numbers of predictors. The adjusted R^2 value incorporates the number of predictors in the model to help choose the correct model. The predicted R^2 of 68.89% determined how well our model predicts the response for new observations. The S value of 134.495, helped to assess how well the model describes the response, which showed that the lower the value of S, the better the model describes the response. The prediction error sum of squares (PRESS) of 422842, is a measure of the deviation between the fitted values and the observed values and it's similar to the sum of squares of the residual error (SSE). PRESS used to assess our model's predictive ability. Usually, the smaller the PRESS value, the better the model's predictive ability.

Table 1.8 ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for the bead width of the welded samples.

Source	Df	Contribution	Sum of Squares	Mean Squares	F- Value	P- Value	Remark
P	1	3.39%	46113	46113	2.55	0.004	Significant
S	1	71.09%	966411	966411	13.56	0.002	Significant
D	1	6.86%	93251	93251	5.16	0.005	Significant
S²	1	13.33%	181202	181202	10.02	0.001	Significant
Error	4	5.32%	72356	18089			
Total	8	100.00%					

$R^2 = 94.68\%$

S= 134.495 **Adjusted $R^2 = 89.35\%$**

Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 422842 **Predicted $R^2 = 68.89\%$**

The mathematical model for bead width, which can be used for prediction within same design space, are shown below:

$$\text{Bead Width } (\mu\text{m}) = 8013 + 0.351 \times P - 562 \times S - 2493 \times D + 12.04 \times S^2 \quad (2)$$

Where P [2200 W; 2700 W], S [15 mm/s; 25 mm/s], and D [0.4 mm; 0.5 mm]. **Figure 1.9** shows the main effect plots for the used welding parameters on the bead width, which indicates the relationship in variation for each parameter with the response.

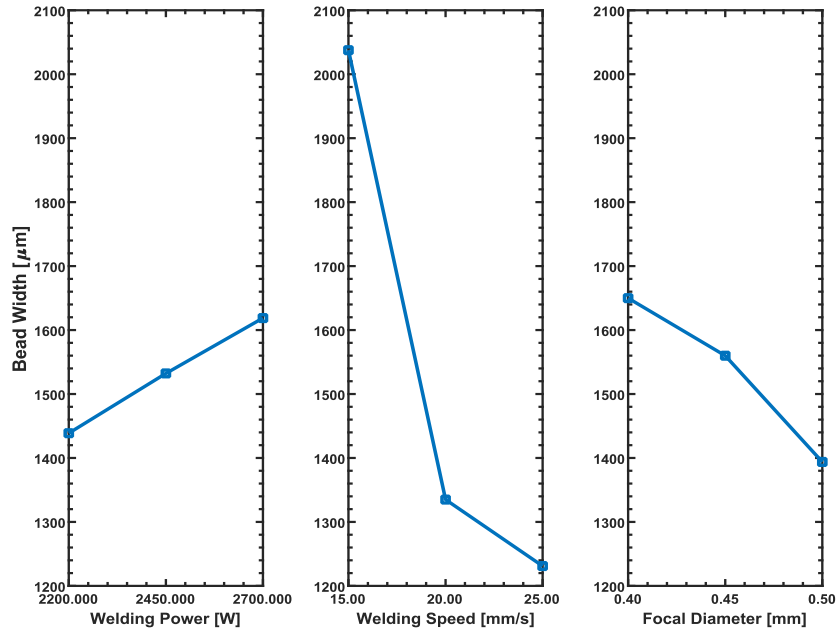


Figure 1.9 Main effect plots for the welding parameters vs. bead width.

The main effect plots of the used welding parameters show that the welding power is directly proportional to the bead width. Unlike the welding power, the welding speed and the focal diameter lines have negative slopes for the bead width. The lowest point in all plots is chosen as the most desired condition for minimizing bead width, which may be determined by welding speed levels between 20 and 25 mm/s.

1.2.6.2 RSM of Bead Width Using ANOVA

The response surface has been created based on the ANOVA prediction model to illustrate the impact of the most important factors on the bead width. The results are shown in **Figure 1.10**. According to the graphs, increasing the welding speed while lowering the welding power enhances the bead width. The welding speed has a significant non-linear impact on the bead width, as can be shown. Higher welding speeds, larger focal diameters, and lower welding power values may all be used to attain the minimum bead width. The smaller bead width may be achieved by welding at a speed of 20 to 25 mm/s.

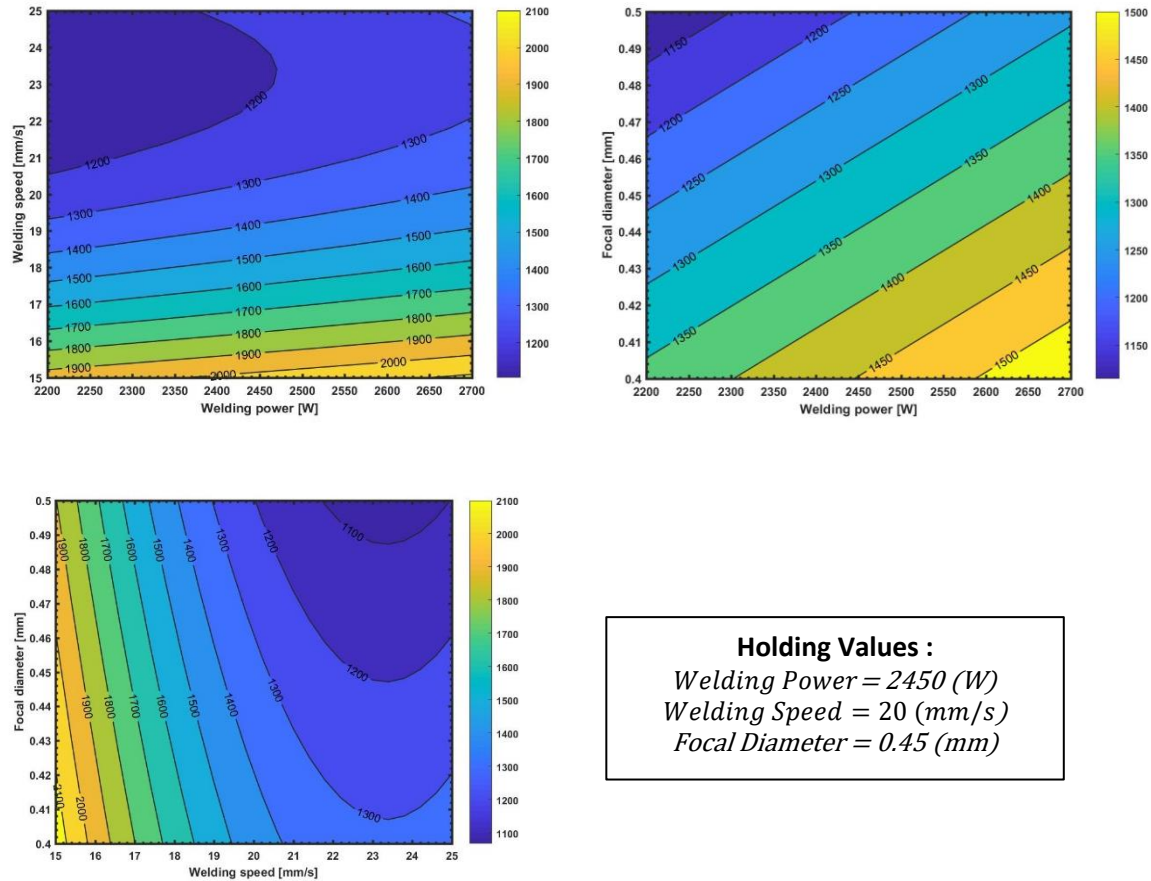


Figure 1.10 Contour Plots of Welding Parameters vs bead width.

1.2.6.3 Tensile Test Results

By following ANOVA principle and concept as in the bead width analysis using Minitab software v18, the ANOVA indicates that for the ultimate tensile force model, the laser power (P), welding speed (S), Focal Diameter (D), and the interaction effect of laser power and focal diameter (P×D). The other terms are not significant and thus, eliminated by the step-by-step elimination process to improve model adequacy [6].

ANOVA is a statistical technique for determining the impact and contribution of each of these variables on final tensile force values by exposing all relevant process parameters. The ANOVA was performed in a step-by-step manner, which eliminates non-significant variables automatically. The variables that have the largest effect on the ultimate tensile force are welding power and welding speed, which account for about 34% and 32% of the total, respectively. The focal diameter has a little influence on the ultimate tensile force, accounting for around 3%. Furthermore, the ultimate tensile force does not reflect this little contribution. ANOVA tables were also utilized to evaluate the importance and effect of design variables on each process's characteristic, demonstrating how ultimate tensile force varies as a function of design parameter variation. The

contribution percentage of the error is minimal, suggesting that no major aspect of the experimental design was overlooked.

The ANOVA result for reduced quadratic model is shown in **Table 1.9**. The high F-values implies that the term is significant. Values of “prob > F” less than 0.05 indicate model terms are significant. The R^2 value of 83.95%, is the percentage of variation in the response that is explained by the model and it's used to determine how well the model fits the data. The higher the R^2 value, the better the model fits the data and it's always between 0% and 100%. Adjusted R^2 of 67.90%, is the percentage of the variation in the response that is explained by the model, adjusted for the number of predictors in the model relative to the number of observations and it's used to compare models that have different numbers of predictors. The adjusted R^2 value incorporates the number of predictors in the model to help choose the correct model. The predicted R^2 of 3.01% determined how well our model predicts the response for new observations. The S value of 1498.14, helped to assess how well the model describes the response, which showed that the lower the value of S, the better the model describes the response. The prediction error sum of squares (PRESS) of 59834505, is a measure of the deviation between the fitted values and the observed values and it's similar to the sum of squares of the residual error (SSE). PRESS used to assess our model's predictive ability. Usually, the smaller the PRESS value, the better the model's predictive ability.

Table 1.9 ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for the maximum forces of the welded samples.

Source	Df	Contribution	Sum of Squares	Mean Squares	F- Value	P- Value	Remark
P	1	34.23%	19148936	6795257	3.03	0.014	Significant
S	1	31.72%	17742884	2363756	1.05	0.032	Significant
D	1	2.68%	1501140	9009098	4.01	0.011	Significant
P×D	1	15.32%	8569196	8569196	3.82	0.011	Significant
Error	4	16.05%	8977747	2244437			
Total	8	100.00%					

$R^2 = 83.95\%$
Adjusted $R^2 = 67.90\%$
Predicted $R^2 = 3.01\%$

S= 1498.14
Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 59834505

The mathematical model for ultimate tensile force, which can be used for prediction within same design space, are shown below:

$$\text{Max. Force (N)} = 162410 - 59.5 \times P - 159 \times S - 372878 \times D + 148.1 \times P \times D \quad (3)$$

Where P [2200 W; 2700 W], S [15 mm/s; 25 mm/s], and D [0.4 mm; 0.5 mm]. **Figure 1.11** shows the main effect plots for the used welding parameters on the ultimate tensile force, which indicates the relationship in variation for each parameter with the response.

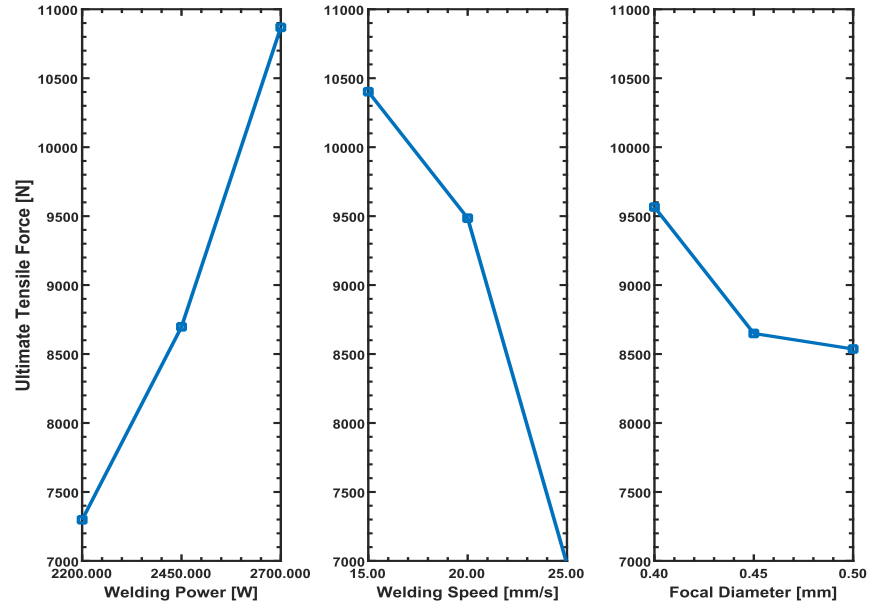


Figure 1.11 Main effect plots for the welding parameters vs. ultimate tensile force.

The welding power is directly proportional to the ultimate tensile force, according to the main effect plots of the employed welding parameters. The welding speed and focal diameter lines, unlike the welding power, exhibit negative slopes for the ultimate tensile force. The highest point in all plots is selected as the most desirable condition for optimizing ultimate tensile strength, which may be obtained by welding power levels between 2450 and 2700 W and welding speed between 15 and 20 mm/s.

1.2.6.4 RSM of Ultimate Tensile Force Using ANOVA

The ANOVA prediction model was used to generate the response surface, which shows the effect of the most significant variables on the final tensile force, [Figure 1.12](#) shows the findings.

The graphs show that increasing welding power while decreasing welding speed improves ultimate tensile force values. To achieve the greatest tensile force, higher welding power, higher focal diameters, and lower welding speed values may all be utilized. Welding power of 2450 to 2700 W and welding speed of 15 to 20 mm/s may be used to produce greater tensile force.

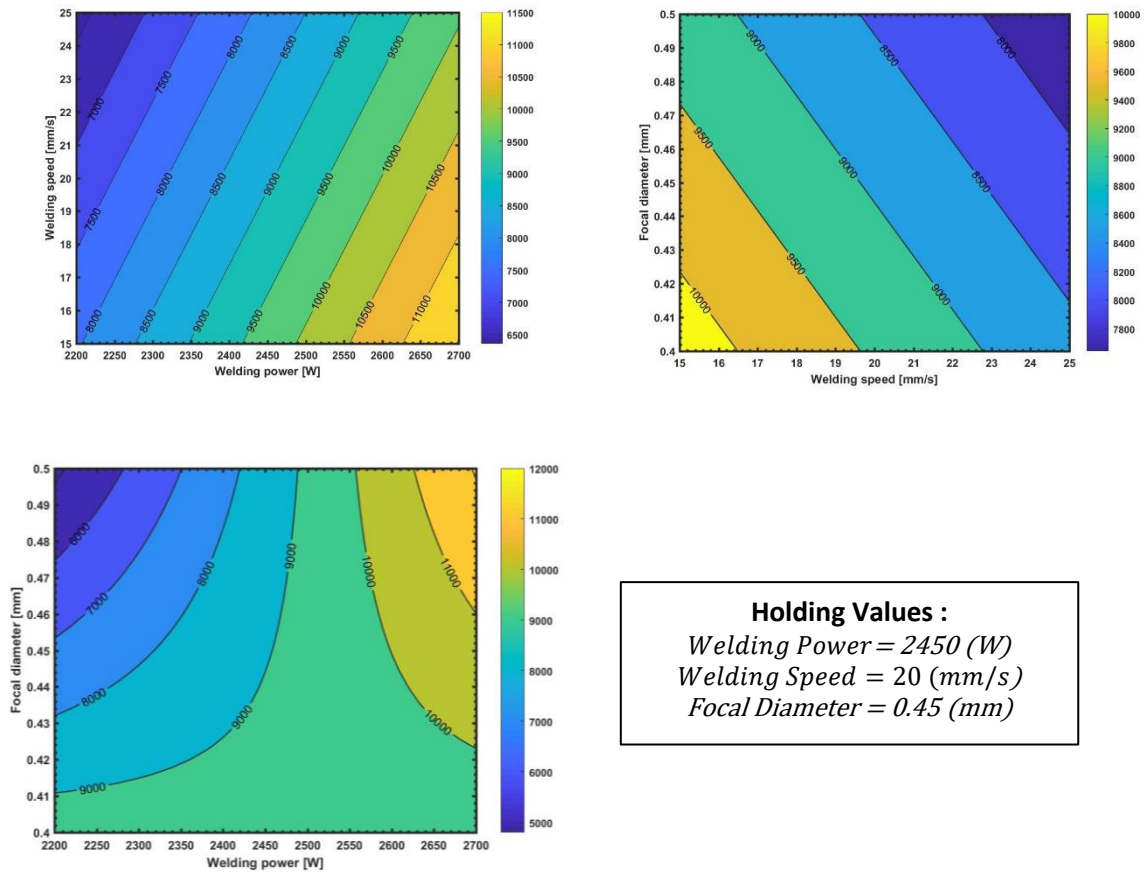


Figure 1.12 Contour Plots of Welding Parameters vs Ultimate Tensile Force.

1.2.7 CONCLUSIONS

This project aimed to improve the mechanical performance and microstructure of the overlap welded AISI 304L plates by using three welding parameters with three different levels and without the use of shielding gas during the welding process. In this project, a several results have been reached that helped to better understand the behavior of the welded metal, and the following was concluded:

- Greater is better, is the criterion was used to analyze the values of the ultimate tensile forces, while (less is better) is the criterion was used to analyze the results of the bead width.
- The welding velocity affects the penetration of welding and the occurrence of spatter, as at high-speed levels the probability of spattering is great in addition to the chance of not having a complete penetration of welding.
- When analyzing the width of the bead, it showed that it is affected mainly by the welding speed in an inverse proportion, as the increase in the welding speed causes the bead width

to decrease. The contour plots illustrate that it is possible to get the smallest bead widths by using high levels of welding speed.

- After obtaining the microhardness results, it can be seen that the behavior of the nine samples was somewhat similar in varying proportions, and samples were having their best microhardness values in the WM in the horizontal directions (fusion zone).
- In the microstructure analysis, it showed that the HAZ contains a single-phase austenite structure and no trace of secondary phases like carbides. Line fusion is characterized by the presence of lightly etched martensite which is in the form of a layer or band and the overlay consists of austenite and ferrite. The weld zone of AISI 304L which possesses an austenitic matrix with oriented colonies of δ -ferrite dendrites (both vermicular and lathy). The increase in delta ferrite in the weldment will improve the mechanical integrity of the welded joint
- After analyzing the results of the ultimate tensile forces of the welded samples resulting from conducting nine tests based on Taguchi's design of experiments, it has been found that it is possible to obtain the highest force values when using a high level of welding power in addition to a medium level of welding speed.
- The welding power was directly proportional to the ultimate tensile forces, while the welding speed and the focal diameter were inversely proportional. The contour plots show that the welding power was the main factor affecting the welding process.

1.2.8 REFERENCES

- [1] Cary, H. B. (Ed.). (1988). *Modern Welding Technology Second Edition*. Prentice-Hall, Inc..
- [2] Cieslak, M. J., & Fuerschbach, P. W. (1988). On the weldability, composition, and hardness of pulsed and continuous Nd: YAG laser welds in aluminum alloys 6061, 5456, and 5086. *Metallurgical Transactions B*, 19(2), 319-329.
- [3] Berretta, J. R., de Rossi, W., das Neves, M. D. M., de Almeida, I. A., & Junior, N. D. V. (2007). Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(9), 960-966.
- [4] Zhang, Y. M., Kovacevic, R., & Li, L. (1996). Characterization and real-time measurement of geometrical appearance of the weld pool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(7), 799-816.
- [5] Omar, A. (1998). G Parameters on Hard Zone Dissimilar Metal Welds. *Welding journal*, 1998, 86-93.
- [6] Anawa, E. M., & Olabi, A. G. (2008). Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components. *Optics and Laser Technology*, 40(2), 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.07.001>.
- [7] Boyce, B. L., Reu, P. L., & Robino, C. V. (2006). The constitutive behavior of laser welds in 304L stainless steel determined by digital image correlation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(8), 2481-2492.
- [8] Cui, Y., & Lundin, C. D. (2005). Effect of microfissures on mechanical properties of 308L austenitic stainless steel weld metals. *Journal of materials science*, 40(5), 1281-1283.
- [9] Foulds, J. R., Moteff, J., Sikka, V. K., & McEnerney, J. W. (1983). Deformation behavior of a 16-8-2 GTA weld as influenced by its solidification substructure. *Metallurgical Transactions A*, 14(7), 1357-1366.
- [10] Brooks, J. A., Goods, S. H., & Robino, C. V. (2000). *Weld Properties of a Free Machining Stainless Steel* (No. SAND2000-8002). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs., Livermore, CA (US).
- [11] Tong, W., Tao, H., Zhang, N., Jiang, X., Marya, M. P., Hector, L. G., & Gayden, X. Q. (2005). Deformation and fracture of miniature tensile bars with resistance-spot-weld microstructures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36(10), 2651-2669.
- [12] K. R, Balasubramanian & Shanmugam, N. & Naidu, Buvanashakaran.G & Sankaranarayananasamy,. (2008). Numerical and Experimental Investigation of Laser Beam Welding of AISI 304 Stainless Steel Sheet. *Journal of Advances in Production Engineering & Management*. 3. 93-105.
- [13] Tsirkas, S.A.; Papanikos, P.; Kermanidis, Th. (2003). Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, 59-69.
- [14] Balasubramanian, K.R.; Sankaranarayananasamy, K.; Buvanashakaran, G. (2006). Analysis of Laser welding parameters using artificial neural network, *International Journal for the Joining of Materials*, Vol. 18, No. 3/4, 99-104.
- [15] Brown, W. F., Mindlin, H., & Ho, C. Y. (1996). *Aerospace structural metals handbook*. CINDAS/USAF CRDA Handbooks Operations, Perdue University.

- [16] Standard Specification for Alloy-Steel and Stainless Steel Bolting Materials for Low-Temperature Service, ASTM A320-05a (2005), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [17] Chen, S., Huang, J., Xia, J., Zhao, X., & Lin, S. (2015). Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 43-51.
- [18] Ng, C. H., Mok, E. S., & Man, H. C. (2015). Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel. *Journal of materials processing technology*, 226, 69-77.
- [19] Tan, W., & Shin, Y. C. (2015). Multi-scale modeling of solidification and microstructure development in laser keyhole welding process for austenitic stainless steel. *Computational Materials Science*, 98, 446-458.
- [20] Reisgen, U., Schleser, M., Mokrov, O., & Ahmed, E. (2012). Optimization of laser welding of DP/TRIP steel sheets using statistical approach. *Optics & Laser Technology*, 44(1), 255-262.
- [21] P. Sathiya ,K.Panneerselvam, R.Soundararajan, “Optimal design for laser beam butt welding process parameter using artificial neural networks and genetic algorithm for super austenitic stainless steel.”, *Optics & Laser Technology* 44 (2012) 1905–1914, 18 January 2012.
- [22] Zhou, J., Tsai, H. L., & Wang, P. C. (2006). Transport phenomena and keyhole dynamics during pulsed laser welding.
- [23] Akbari, M., Saedodin, S., Toghraie, D., Shoja-Razavi, R., & Kowsari, F. (2014). Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy. *Optics & Laser Technology*, 59, 52-59.
- [24] Hauser, D., & Van Echo, J. (1978). Effect of Delta Ferrite Content of E 308-16 Stainless Steel Weld Metal. II.—Mechanical Property and Metallographic Studies. *Properties of Steel Weldments for Elevated Temperature Pressure Containment Applications*, 17-46.
- [25] Lifang Mei , Genyu Chen, Xiang 55hong Jin, Yi Zhang, Qiang Wu , “Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets”, *Optics and Lasers in Engineering* 47 (2009) 1117–1124, 30 June 2009.
- [26] Bringas, J. E. (2004). Handbook of comparative world steel standards (ASTM DS67B). In *Library of Congress Cataloging*.
- [27] Harvey, P. D. (1982). *Engineering properties of steel*. ASM International.
- [28] Smith, W. F. (1993). *Structure and properties of engineering alloys*. McGraw-Hill.
- [29] Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., & Date, J. Z. (2006). Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. *The Michigan chemical process dynamic and controls open text book, USA*, 2(3), 4.
- [30] Hafez, K. M., & Katayama, S. (2009). Fiber laser welding of AISI 304 stainless steel plates. *Quarterly journal of the japan welding society*, 27(2), 69s-73s.
- [31] Wang, W., Han, Y., Liu, T., Lu, Y., & Shoji, T. (2020). Effect of surface potential on corrosion behavior of the fusion boundary in the dissimilar welds between 316L stainless steels and Inconel 182 alloy. *Journal of Materials Science*, 55(2), 774-785.
- [32] Yazdian, N., Mohammadpour, M., Razavi, R., & Kovacevic, R. (2018). Hybrid laser/arc welding of 304L stainless steel tubes, part 2—Effect of filler wires on microstructure and corrosion behavior. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 163, 45-54.

CHAPITRE 2

ÉTUDE COMPARATIVE DES PARAMÈTRES DU FAISCEAU LASER OSCILLANT SUR DES PLAQUES 304L SOUDÉES SELON UNE CONFIGURATION DE JOINT BOUT À BOUT - MOTIFS CARRÉ ET TRIANGULAIRE

2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE

Le soudage laser est une technique potentiellement utile pour joindre deux pièces de matériaux similaires ou dissemblables avec une grande précision. Dans le présent travail, des études comparatives sur le soudage au laser de deux motifs de soudure carrés et triangulaires de l'AISI 304L ont été menées en formant des joints bout à bout. Un contrôle robotique de 3 KW de source laser Nd : YAG continue a été utilisé pour le soudage. Les effets de la puissance, de la vitesse et de la fréquence du laser sur la résistance à la traction, la microdureté et la microstructure ont été étudiés à l'aide des modèles empiriques développés par Taguchi. Les résultats de l'ANOVA indiquent que les modèles développés prédisent les réponses de manière adéquate dans les limites des paramètres d'entrée. En outre, le comportement en traction de la soudure sélectionnée de motifs triangulaires et carrés a été effectué pour comprendre le comportement mécanique de la soudure. Des diagrammes de contour ont été développés pour découvrir les effets combinés des paramètres d'entrée sur les réponses. Ces combinaisons de paramètres de soudage ont fourni les meilleures propriétés mécaniques et de traction pour les échantillons soudés, et trouvent un accord raisonnable avec l'approche de modélisation Taguchi. Cependant, les résultats ont montré que le motif carré présente de meilleures propriétés mécaniques que le motif triangulaire pour une condition paramétrique donnée.

Mots clés : AISI 304L, soudage au laser fibre, microstructure, propriétés mécaniques, faisceau laser oscillant, configuration bout à bout, méthode Taguchi, méthode ANOVA.

Ce deuxième article, intitulé « Étude Comparative Des Paramètres Du Faisceau Laser Oscillant Sur Des Plaques 304L Soudées Selon Une Configuration De Joint Bout À Bout - Motifs Carré Et Triangulaire », a été coécrit par moi-même ainsi que par le professeur Nouredine Barka. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2021 par le *Journal of Materials Research and Technology (JMR&T)*. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail a été l'essentiel de la recherche de pointe, du développement de la méthode, des tests de performance et de la rédaction de l'article. Le professeur Barka, deuxième auteur, a fourni l'idée originale. Il a également participé à la recherche sur l'état de l'art, au développement de la méthode ainsi qu'à la révision de l'article.

2.2 COMPARATIVE STUDY OF OSCILLATING LASER BEAM PARAMETERS ON WELDED 304L PLATES IN BUTT JOINT CONFIGURATION - SQUARE AND TRIANGULAR PATTERN.

2.2.1 ABSTRACT

Laser welding is a potentially useful technique for joining two pieces of similar or dissimilar materials with high precision. In the present work, comparative studies on laser welding of two welding patterns of square and triangular welding patterns of AISI 304L have been conducted forming butt joints. A robotic control 3 KW of continuous Nd: YAG laser source has been used for welding purposes. The effects of laser power, laser speed, and laser frequency on the ultimate tensile strength, microhardness, and microstructure have been investigated using the empirical models developed by Taguchi. The results of ANOVA indicate that the developed models predict the responses adequately within the limits of input parameters. Furthermore, the tensile behavior of the selected weld of triangular and square patterns has been carried out to understand the mechanical behavior of the weld. Contour plots have been developed to find out the combined effects of input parameters on responses. These combinations of welding parameters provided the best tensile and mechanical properties for the welded samples, and find a reasonable agreement with the Taguchi modeling approach. However, the results showed that the square pattern has better mechanical properties than the triangular pattern for a given parametric condition.

Key Words: AISI 304L, Fiber Laser Welding, Microstructure, Mechanical Properties, Oscillating Laser Beam, Butt Configuration, Taguchi Method, ANOVA Method.

2.2.2 INTRODUCTION

A large number of studies have been conducted in the field of laser beam delivery systems, mechanical behavior of laser welded austenitic stainless-steel sheets, finite element analysis of melt pool to estimate the fusion zone, heat-affected zone, and residual stresses [1]. LBW has the advantages of deep penetration, high aspect ratio, narrow heat-affected zone (HAZ), fine grains, and excellent mechanical properties due to high energy density [2]. The useful characteristics of laser welding are low distortion due to heat, noncontact process, repeatability, ability to automate, and high throughput.

Welding with oscillated laser beam is a well-established production process, gaining renewed interest since high power lasers with superior beam quality and virtually unlimited output power became affordable [3]. Laser welding with high frequency beam oscillation is studied as a method to increase the stability of the welding process. Bright beam and process stability at high power levels opens new possibilities for beam manipulation [4]. High-power beams produce deep nail-shaped welds with high depth-to-width ratio, however its applicability is limited because of extreme demands to joint fit-up accuracy [5]. One way to overcome this challenge is wobbling the laser beam over the joint in a predetermined pattern [6]. Research for growing range of applications is motivated also by advances in beam delivery equipment, as smaller dimensions of the processing

head improve the joint accessibility and overall flexibility of the welding process [7,8]. Beam oscillation distributes the beam energy across a wider area and produces fully bridged and defect free joints with excellent geometrical features at the expense of slightly reduced processing speed [9].

Oscillating laser beam welding has shown in many studies the ability to affect the inner weld seam quality, the dilution degree within the melt pool and to influence the welds surface appearance [10-14]. Müller, A. et al. [10], also have been presented some preliminary studies on the process efficiency of oscillated laser beam welding for the sinusoidal, triangular, and square-shaped oscillation profiles. The resultant welding results are affected by actively adjustable parameters, such as the welding speed, laser power, and beam oscillation frequency for each pattern. Müller, M. G. [15] showed that welding with an oscillated 300 μm spot generates more molten material compared to commonly used welding spots of 600 μm . Therefore, the process efficiency increases due to multiple reflections of the laser beam within the melt pool. Lehner et al. [16], found that the gap width should be controlled below 10% of workpiece thickness, because a larger gap may cause the defect of weld sag. Katayama [17], explained that a fast solidification rate was the main reason for increasing the crack within laser welds of austenitic stainless steel. Rubben et al. [18], have investigated the improvement of laser welding quality with beam oscillating along the weld, by using beam oscillating with a maximum frequency of 200 Hz, the gap tolerance of tailed blanks was increased to 0.3mm, 25% of sheet thickness. Schedewy et al. [19], proved that when using a high beam oscillating frequency of 100–200 Hz, fiber laser oscillating welding of carbon steel becomes unstable because the liquid metal is thrown out of the molten pool by the fast-moving laser beam. Choi et al. [20], found that the crack capability of the aluminum alloy welds can be minimized by laser oscillating welding with a frequency of 5 Hz. Kim et al. [21], showed that the shear-tensile strength of the aluminum alloy joint made by disk laser oscillating welding is 29% higher than that of conventional laser welding. Vanska and Salminen [22], supposed that laser oscillating welding could increase the safety factor of industrial applications by widening the weld. Yamazaki et al. [23], showed that increasing beam oscillating frequency widens but shallows the weld. Schweier et al. [8], demonstrated that either increasing welding speed or decreasing laser power helps reduce the spatter number during laser oscillating welding. Hao et al. [2] have investigated the effects of beam oscillating parameters on the weld morphologies. They have found that the difference in cross-section width from top to the lower gradually has reduced to disappear with the increase in oscillating frequency.

All the above studies showed that laser oscillating welding is likely to settle the welding process and improve the welding quality. Up to now, relevant studies especially weld formation mechanisms and the effects of beam oscillating patterns on weld characterization are few.

The purpose of this study is to identify and analyze the relationships between oscillating laser welding process parameters using square and triangular patterns, and the shape and dimensions of the weld bead, and mechanical performance in the case of welding AISI 304L plates with dimensions of (125×50×2) mm in butt configuration, as well as without using a shielding gas during the welding process and by considering that the gap distance between the welded parts is equal zero. To improve performance, this research will extract the impacts, contributions, and interactions between variables such as welding power, welding speed, and welding frequency, and compare the utilized oscillating patterns.

On AISI 304L plates, the experiments are conducted. The study made use of a fiber laser that produces a beam with a wavelength of 1070 nm and a maximum power of 3000W. To get the best

results with the fewest trials, an experimental design based on the Taguchi technique is selected. The laser's power, welding speed, beam diameter, and welding frequency are all taken into consideration.

The microstructure, microhardness, and ultimate tensile strength of the weld are mentioned as quality characteristics. After welding, samples are subjected to a typical metallographic technique that includes cutting, polishing, etching, and microscopic examination. The findings are subjected to an ANOVA statistical analysis in order to determine the impact of the factors examined and their contributions to the variation of the different attributes.

2.2.3 EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.2.3.1 Experiment Setup

In this project, two AISI 304L plates, with dimensions of 125 mm × 50 mm × 2 mm were used as workpieces as in [Figure 2.1](#) which shows a welded sample forming a butt joint. The welded plates had then machined to five tensile specimens for the tensile test as in [Figure 2.2](#). The chemical composition and the mechanical properties of the base metal shown in [Table 2.1](#) and [2.2](#) respectively were used in this study [\[24,25\]](#).

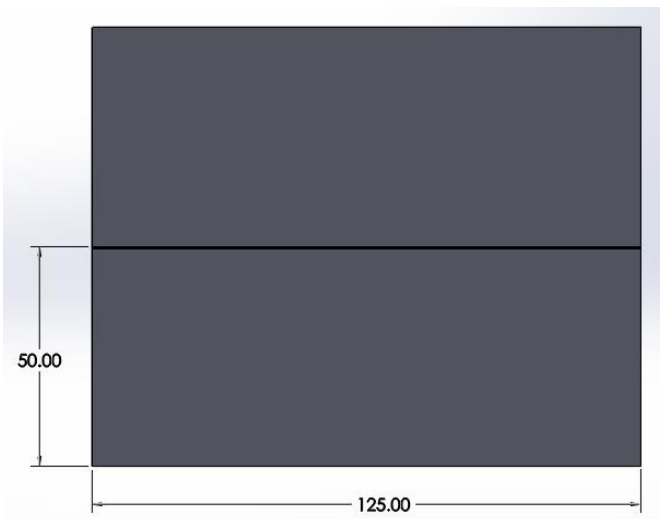


Figure 2.1 Oscillating laser welded plates.

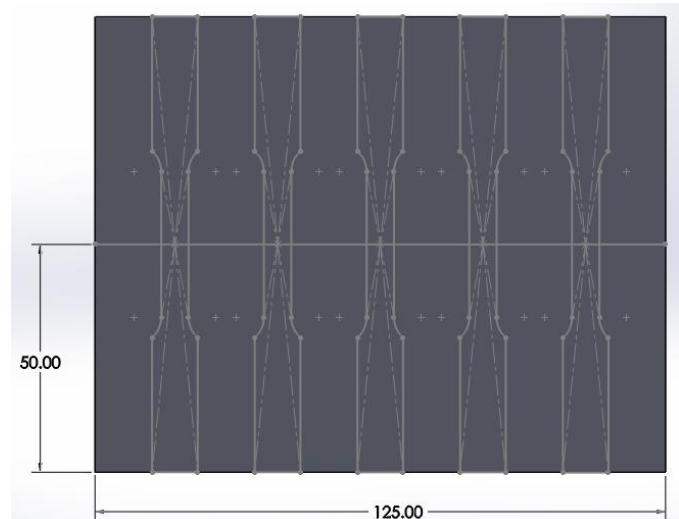


Figure 2.2 Oscillating laser welded sample for tensile test.

Table 2.1 Chemical composition of AISI 304L plates (wt%) [\[24\]](#).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.03%	0.75%	2%	0.045%	0.03%	20%	12%	0.1%	65%

Table 2.2 Mechanical properties of AISI 304L plates [25].

Yield Strength (Mpa)	Ultimate Tensile Strength (Mpa)	Elongation %	Hardness (HV)
210 Mpa	564 Mpa	58%	161 HV

In this work, AISI 304L was used as the substrate material to investigate the effects of welding parameters on its welding quality. This alloy can be welded even in severe corrosive conditions. In many cases, it eliminates the necessity of annealing weldments except for applications specifying stress relief. It has slightly lower mechanical properties than type 304, and the carbon is kept to 0.03% as maximum. The type 304L is more expensive, and it is considered as weldable stainless steel. Since it does not require post-weld annealing. Therefore, it is extensively used in heavy gauge components. Carbon included in this grade of stainless steel imparts great physical strength at high temperatures [26].

The laser process that used to perform the welding tests for this project with no shielding gas is consists of a FANUC M-710iC robot as shown in [Figure 2.3](#). That directs a light beam from a laser head powered by a fiber laser with a power of 3kW of class 4 emitting at 1070 nm, model IPG YLS-3000-ST2. The HIGHYAG BIMO laser head is equipped with a variable zoom collimator and a fixed focusing lens. Together, this produces circular focal spots of 0.4 mm in diameter, and 200 μm optical fiber was used for laser welding applications on metallic materials. ILV DC-Scanner was used to form the laser beam oscillating patterns as shown in [Figure 2.4](#). This device makes it possible to scan the surface exposed by the laser radiation for the purposes of heat treatments or other surface treatments. Its capabilities allow the beam to reach maximum amplitudes of 0.7mm ($\leq 600\text{Hz}$) to 15mm ($\leq 120\text{Hz}$). The two metal samples are clamped near each other forming butt joint during the laser welding process and it is assumed that a zero-gap is obtained. A robotic control panel is used to control the weld path and implement the weld procedure.

Welded joints were visually inspected and samples were sectioned transverse to the welding direction, mechanically polished and etched. Samples were prepared for the metallographic examinations by polishing successively in emery papers to remove the scratches. Marble (HCl (conc.) 50 ml + saturated solution CuSO_4 , in H_2O_2 25 ml) acid's reagent was used for revealing weld microstructure. Furthermore, a micro-hardness survey has been made on flat metallographic specimens across the joints and top to bottom in the weld using Vickers's micro-hardness testing machine (Make: CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0) optical microscope at 100 gf load with 100 μm dot spacing along the vertical and horizontal direction. CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0 was used too to study the microstructure in the fusion and heat-affected zones of the welds.

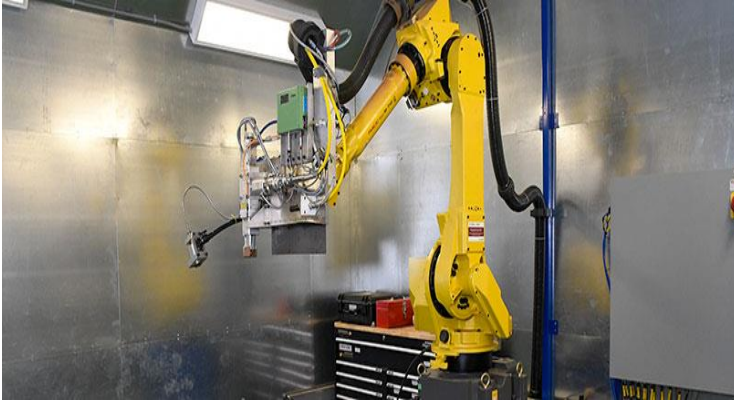


Figure 2.3 FANUC M-710iC arm type robot with 6-axis.



Figure 2.4 ILV DC-Scanner.

2.2.3.2 Design of Experiments (DOE)

An experimental design based on the Taguchi technique was used to acquire the data. The experiments were carried out on the basis of three factors, three levels. The experimental procedure includes a series of laser welding tests on AISI 304L stainless steel plates with various combinations of process parameters such as welding power, welding speed, and welding frequency. The laser beam oscillation amplitude has set to be equal to 1.

The experimental procedure consists of a series of tests aimed at developing and evaluating the knowledge base on laser welding of AISI 304L samples. Taguchi's L_9 (3^3) orthogonal array is used in this project and this will allow to perform nine experiments. Welding Parameters for each condition and response factors are listed in **Table 2.3**, while the used design of experiments (DOE) is listed in **Table 2.4**.

Table 2.3 Welding Parameters for each condition and response factors.

Symbol	Parameters	Level (1)	Level (2)	Level (3)
P	Welding Power (W)	2000	2100	2200
S	Welding Speed (mm / s)	35	40	45
F	Welding Frequency (Hz)	250	350	450

Table 2.4 Experimental layout (L_9) showing different welding parameters.

Experimental no.	Factor (P)	Factor (S)	Factor (F)
	Welding Power (W)	Welding Speed (mm / s)	Welding Frequency (Hz)
1	2000	35	250
2	2000	40	350
3	2000	45	450
4	2100	35	350
5	2100	40	450
6	2100	45	250
7	2200	35	450
8	2200	40	250
9	2200	45	350

DOE is a technique to define and invest all possible combinations in an experiment involving several factors and to identify the best combination. In this, different factors and their levels are identified. The design of the experiments (DOE) is also useful for combining the factors at appropriate levels, each with the respective acceptable range, to produce the best results while having minimal variation around the optimal results, so that better quality products can be produced, quickly and at a minimal cost.

The Taguchi method achieves the marriage of design of experiments with the optimization of control parameters in order to obtain the best results. Orthogonal Arrays (OA) provide a well-balanced set of experiments (minimum) and Mr. Taguchi's signal-to-noise (S / N) ratios, desired output logarithmic functions, serve as objective functions in optimization, help to data analysis and the signal to noise ratio (S / N) for each level is based on the analysis of the (S / N) ratio. Based on the tensile strength of the welded joint (bigger, better), a higher S / N ratio produces a better-quality value. The standard (S / N) ratio formula for this type of response is: The S / N ratio η is defined as $\eta = -10 \log (\text{M.S.D.})$ Where M.S.D. is the mean square deviation for the output characteristic [27].

$$n_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_{ij}^2} \right] \quad (1)$$

Where (i) is the number of a trial; (Y_{ij}) is the quality of (i ^ th) process and (j ^ th) experience; (n) is the total number of experiments. Here in the present study, our goal is to obtain the ultimate tensile strength for the two oscillating patterns and compare between them to find which pattern has better results. Consequently, the (larger is better) the criterion used to optimize the parameters for the ultimate tensile strength of the welded joints. All the experiments were carried out on MTS 810 Material testing system. During the test, the sample is pulled from each end with increasing the load. When a certain load is reached (load at which the sample yield), the sample begins to fail and then break. From the stress-strain curves produced the values of ultimate tensile strength σ_{UTS} are extracted. The failure region in which each sample failed was recorded and all of this information is shown in following sections.

2.2.4 MICROSTRUCTURE, AND MICROHARDNESS TEST RESULTS

The front appearances of the butt weld joints for the square pattern are shown in **Table 2.5**. As shown in **Table 2.5**, the welds are continuous in the surfaces without cracks, and uniform fish-scale patterns are observed. Some samples display the front appearance as yellow or silvery white. By contrast, another sample's front appearance of all the welds is silvery-white in color, indicating effective protection for the joints through gas shielding. With increasing the laser power up to 2200 W, and the welding frequency up to 450 Hz, and decreasing welding speed to 35 mm/s, the front appearances of the welds present color of purple or blue with high spatter as in welded sample No.7, which indicates that the oxidation of the front appearances is further deepened [28], and as can be seen the weld width is obviously largest than those of other samples, indicating the higher heat input. Spatters also have been noticed in welded samples No.1, No.4, No. 5, and No.6.

Table 2.5 The front appearance of the laser-welded AISI 304L joints, which represents W1 to W9 samples.

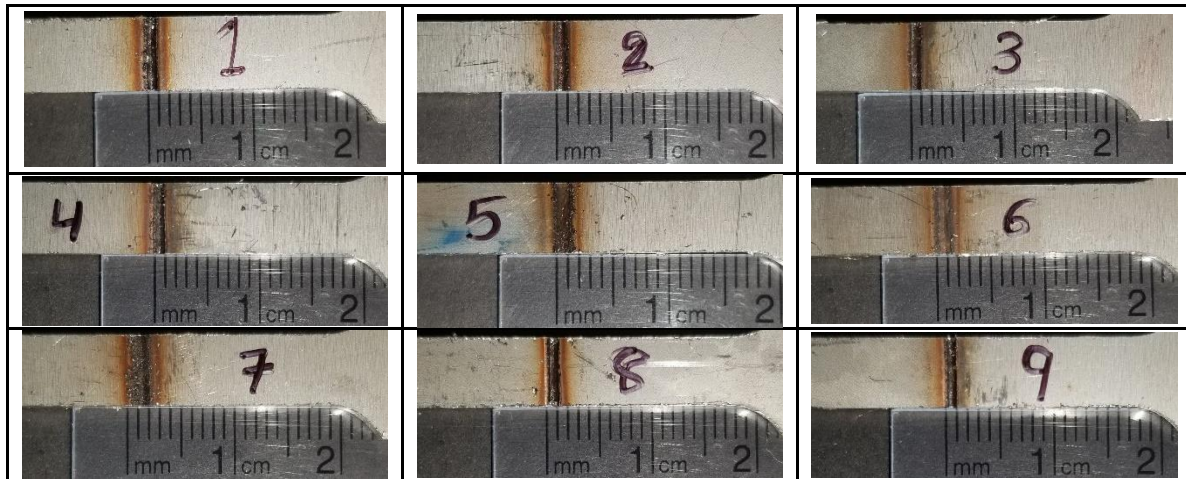
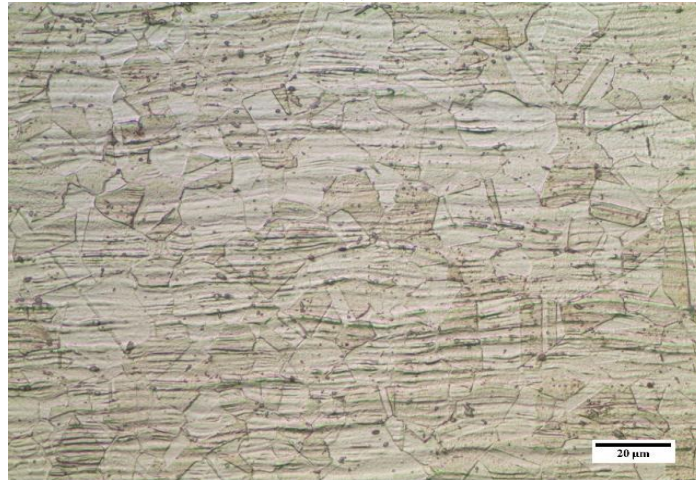


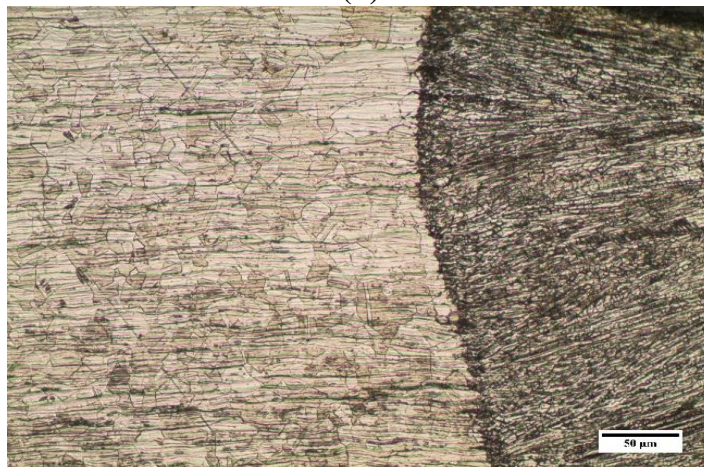
Figure 2.5(a) shows the microstructure of the butt joint for the square pattern. The joint consists of HAZ, WM, and interface zone (fusion line) as presented in **Figure 2.5(a)- 2.5(c)**. The HAZ microstructure comprises the austenite structure observed and no trace of secondary phases like carbides was found. **Figure 2.5(b)** shows the fusion line (between the HAZ and the fusion zone) is characterized by the presence of lightly etched martensite which is in the form of a layer or band and the overlay consists of austenite and ferrite. There are significant differences between the morphology of the fusion line and the HAZ, which is in accordance with the available literature [29]. The microstructure of the (c) zone in **Figure 2.5(c)** reveals that the WM is composed of planar, cellular, columnar, and equiaxed dendrites growth. The WM region is composed of austenite and a delta ferrite phase. During cooling, the primary delta ferrite solidifies in the WM zone, and then, the transformation delta ferrite \rightarrow austenite occurs. This result shows that the mode

of solidification is FA mode, in which the primary phase is ferrite and the secondary phase is austenite during WM solidification [30]. The increase in delta ferrite in the weldment will improve the mechanical integrity of the welded joint [31].

(a)



(b)



(c)

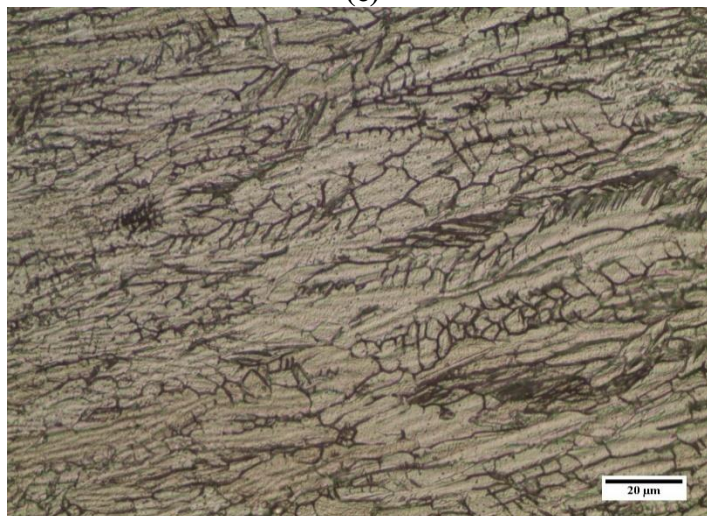


Figure 2.5 Optical micrographs of square welded AISI 304L showing: (a) HAZ, (b) Fusion Line, and (c) Weld Metal.

The samples for microhardness were acquired from the thickness section (vertical to the direction of the flow of welded-section) and the longitude section (horizontal to the direction of the flow of welded-section) of AISI 304L plates for the square pattern. Microhardness of the Weld Zone (WZ), Heat Affected Zone (HAZ), and Base Metal (BM) was measured using a CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0 Vicker's micro-hardness tester using a load of 100 gf with a step range between (75 -100) μm .

Measurements were carried out at many data points to obtain the value of microhardness on WZ, HAZ, and BM. The observed microhardness for all three zones is shown in [Figure 2.6](#) for samples No.3 and No.6 for the square pattern. It has been analyzed that the highest microhardness was found beneath the weld-bead in close proximity to the fusion zone for the vertical section and the highest microhardness for the horizontal section was located on the HAZ.

In general, enhancement in micro-hardness is a tribute to the formation of fine grains in WZ and coarse grain refinement in HAZ due to variation in a thermal gradient. These changes can be attributed to thermal cycles produced during intermittent heating/cooling of the weld, fusion zone, and HAZ [\[32\]](#). As the highest heat is soaked by this portion, which results in the solid-state transformation of F \rightarrow A (austenitic grain growth), ultimately results in hardness enhancement of weld [\[33\]](#). The microhardness of HAZ and WM is found more than BM.

It can be associated with an increase in heat input that enhances the stress and grain coarsening, consequently increases Primary Dendrite Arm Spacing (PADS) and Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS) between dendritic grains and arms respectively [\[34,35\]](#). These transitions directly influence the microhardness of Grade 304L steel, hence weld hardness increases.

According to Morris [\[36\]](#), "Hall Petch behavior" lesser is the grain size, larger is the micro-hardness. Thus, the formation of fine grains increases the micro-hardness at higher cooling rates (12.063 $^{\circ}\text{C/s}$ - 12.194 $^{\circ}\text{C/s}$). Microhardness of HAZ is also found greater than BM microhardness

for all welded specimens. This behavior is attributable to the recrystallization of coarse grains into fine grains in HAZ.

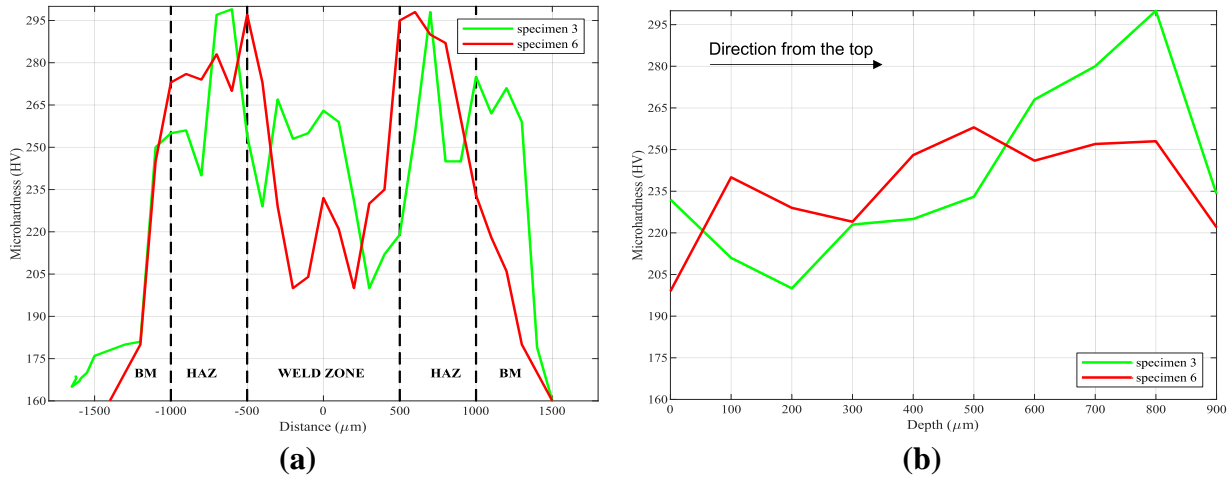


Figure 2.6 Microhardness test configuration; Microhardness plots of welded joints No.3 and No.6: (a) across the fusion zone, and (b) Through the thickness section.

2.2.5 TENSILE TEST RESULTS

In order to perform the tensile test for the welded specimens, the welded plates had machined to five equal tensile specimens with dimensions of 100 mm x 10 mm x 2 mm as shown in [Figure 2.7](#). The measured response for the triangular pattern and square pattern is listed in [Table 2.6](#) and [Table 2.7](#) respectively, Minitab v18 software has been applied for analyzing the measured responses and determining the mathematical models with the best fit. The fitted quadratic polynomial model for response is statistically significant for the prediction within the working range of welding parameters. Therefore, they will be used for further analysis.

From the Stress-Strain curves for the welded specimens as shown in [Figure 2.8](#), which indicates that the maximum and minimum ultimate tensile strength for the triangular pattern is observed for specimen no. 1 ($P = 2000$ W, $S = 35$ mm/s, and $F = 250$ Hz) and sample no. 9 ($P = 2200$ W, $S = 45$ mm/s and $F = 350$ Hz) respectively. For the square pattern, the maximum and minimum ultimate tensile strength are observed for specimen no. 3 ($P = 2000$ W, $S = 45$ mm/s, and $F = 450$ Hz) and sample no. 6 ($P = 2100$ W, $S = 45$ mm/s and $F = 250$ Hz) respectively. The responses observation of the ultimate tensile strength of the triangular pattern and the square pattern refers to that the square pattern has a higher σ_{UTS} than the triangular pattern when both processes are subjected to the same welding conditions with the same parameters range, and the value of the increase in the ultimate tensile strength was approximately 6.5% from the σ_{UTS} of the triangular pattern. Based on that, the statistical analysis of the square pattern to find the best fit mathematical model is our interest as shown in the following section.

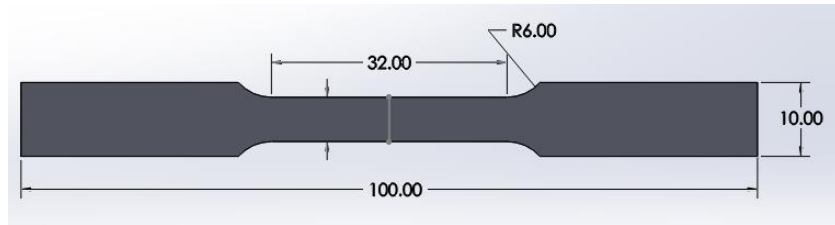


Figure 2.7 Welded tensile test specimen.

Table 2.6 Design of experiment for welding factors and measured experimental results of the triangular pattern.

Experimental no.	P (W)	S (mm/s)	F (Hz)	σ_{UTS} (MPa)	Fracture Point
1	2000	35	250	532.3583333	Weld metal
2	2000	40	350	509.0966667	Weld metal
3	2000	45	450	459.9433333	Weld metal
4	2100	35	350	401.4833333	Weld metal
5	2100	40	450	514.5133333	Weld metal
6	2100	45	250	505.2033333	Weld metal
7	2200	35	450	508.9166667	Weld metal
8	2200	40	250	525.1366667	Weld metal
9	2200	45	350	396.6733333	Weld metal

Table 2.7 Design of experiment for welding factors and measured experimental results of the square pattern.

Experimental no.	P (W)	S (mm/s)	F (Hz)	σ_{UTS} (MPa)	Fracture Point
1	2000	35	250	493.980	Weld metal
2	2000	40	350	547.780	Weld metal
3	2000	45	450	569.297	Weld metal
4	2100	35	350	561.930	Weld metal
5	2100	40	450	510.280	Weld metal
6	2100	45	250	480.287	Weld metal
7	2200	35	450	489.020	Weld metal
8	2200	40	250	495.927	Weld metal
9	2200	45	350	505.437	Weld metal

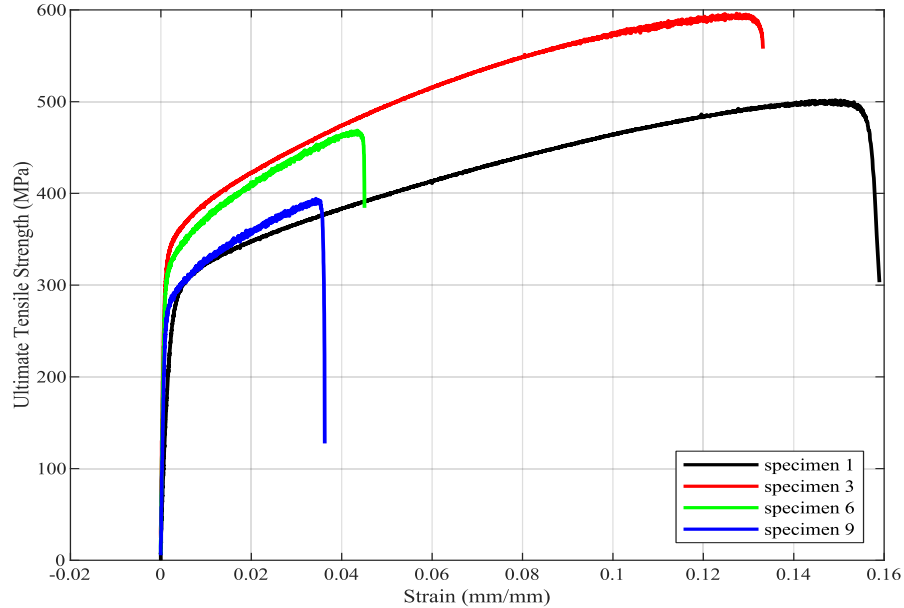


Figure 2.8 Stress- Strain Curves for the maximum and minimum σ_{UTS} of the square and triangular pattern.

2.2.6 STATISTICAL ANALYSIS

2.2.6.1 Tensile Test Results

The adequacy of the developed model is tested by the sequential f-test, and analysis-of-variance (ANOVA) technique using the Minitab v18 software to obtain the best fit model. The ANOVA tables also show the other adequacy measure R^2 , adjusted R^2 , and predicted R^2 for response is given in [Table 2.8](#) The associated p-value of less than 0.05 for the model (i.e., p-value < 0.05, at 95% confidence level) indicates that the model terms are statistically significant. The ANOVA indicates that for the ultimate tensile strength model, the laser power (P), welding speed (S), Welding Frequency (F), the interaction effect of laser power and welding frequency ($P \times F$), the quadratic effect of the welding speed (S^2) and the quadratic effect of the welding frequency (F^2) are the significant model terms. The interaction effect of laser power and welding speed ($P \times S$) and the interaction effect of the welding speed and the welding frequency ($S \times F$), and the quadratic effect of the welding power (P^2) are not significant terms and thus, eliminated by the step-by-step elimination process to improve the model adequacy [\[37\]](#).

ANOVA is a statistical technique for assessing the impact and contribution of each of these variables on bead width values by exposing all relevant process parameters. The ANOVA was carried out in a step-by-step manner, which eliminated non-significant variables automatically.

According to the data, the residual is small, accounting for less than 10% of the variation in σ_{UTS} . Welding power, which accounts for about 27% of the total, and welding frequency, which accounts for nearly 18%, are the two factors that have the largest effect on σ_{UTS} . Welding speed has just a 0.19 percent effect on the σ_{UTS} . In addition, the σ_{UTS} does not represent this little contribution.

ANOVA tables were also utilized to evaluate the significance and effect of design variables on each process's characteristic, demonstrating how σ_{UTS} varies as a function of design parameter variation. The contribution percentage of the error is minimal, suggesting that no important aspect of the experimental design was overlooked.

The ANOVA result for the reduced quadratic model is shown in **Table 2.8**. The high F-values imply that the term is significant. Values of “prob > F” less than 0.05 indicate model terms are significant. The R^2 value of 99.89%, is the percentage of variation in the response that is explained by the model and it's used to determine how well the model fits the data. The higher the R^2 value, the better the model fits the data. The predicted R^2 of 98.03% determined that our model predicts the response for new observations at a very good level of prediction.

The S value of 2.21400, helped to assess how well the model describes the response, which showed that the lower the value of S, the better the model describes the response.

The prediction error sum of squares (PRESS) of 176.572, is a measure of the deviation between the fitted values and the observed values and it's similar to the sum of squares of the residual error (SSE). PRESS used to assess our model's predictive ability. Usually, the smaller the PRESS value, the better the model's predictive ability.

Table 2.8 ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for UTS of square welded samples.

Source	Df	Contribution	Sum of Squares	Mean Squares	F- Value	P- Value	Remark
P	1	27.01%	2015.50	2015.50	411.18	0.002	Significant
S	1	0.19%	545.06	545.06	111.20	0.009	Significant
F	1	17.96%	4379.10	4379.10	893.36	0.001	Significant
S²	1	0.04%	496.92	496.92	101.37	0.010	Significant
F²	1	22.68%	2037.43	2037.43	415.65	0.002	Significant
P×F	1	32.01%	2875.92	2875.92	586.71	0.002	Significant
Error	2	0.11%	9.80	4.90			
Total	8	100.00%					

S = 2.21400	R² = 99.89%
Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 176.572	Adjusted R² = 99.56%
	Predicted R² = 98.03%

The mathematical model for ultimate tensile strength, which can be used for prediction within same design space, is shown below:

$$\text{Ultimate Stress (MPa)} = -1020 + 1.1261 \times P - 0.9975 \times S + 10.362 \times F + 0.000196 \times S^2 - 0.003192 \times F^2 - 0.003792 \times P \times F \quad (2)$$

Where P [2000 W; 2200 W], S [35 mm/s; 45 mm/s], and F [250 Hz; 450 Hz]. **Figure 2.9** shows the main effect plots for the used welding parameters on the ultimate tensile strength, which indicates the relationship in variation for each parameter with the response.

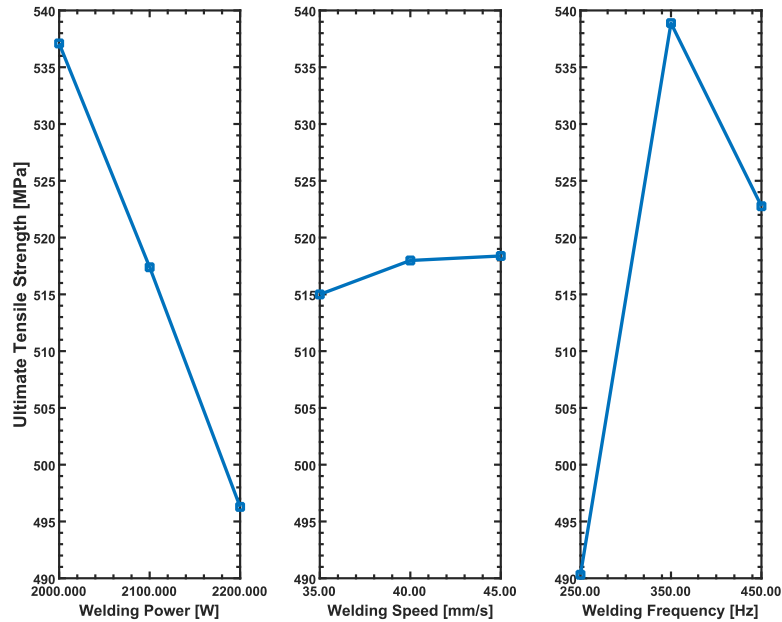


Figure 2.9 Main effect plots for the welding parameters vs. ultimate tensile strength.

The welding power line has a negative slope to the σ_{UTS} , as shown by the major effect plots of the employed welding parameters. The welding speed has a nearly horizontal line to the σ_{UTS} , indicating that the change of this welding parameter has little effect on the σ_{UTS} , whereas the welding frequency line has a non-linear behavior. The most desirable condition for maximizing σ_{UTS} is the highest point in all plots, which may be obtained by welding frequency levels between 250 and 350 Hz and welding power of 2000 W.

2.2.6.2 RSM of Ultimate Tensile Strength Using ANOVA

To demonstrate the effect of the most significant variables on the UTS, the response surface was generated using the ANOVA prediction model, **Figure 2.10** shows the findings.

Increasing the welding frequency while decreasing the welding power improves the UTS, according to the graphs. As can be seen, the welding frequency has a substantial non-linear effect on the UTS. To achieve the highest UTS, higher welding frequency, lower welding power, and lower welding speed values may all be utilized. Welding at a frequency of 350 to 450 Hz and a welding power of 2000 to 2100 W produces the greatest UTS.

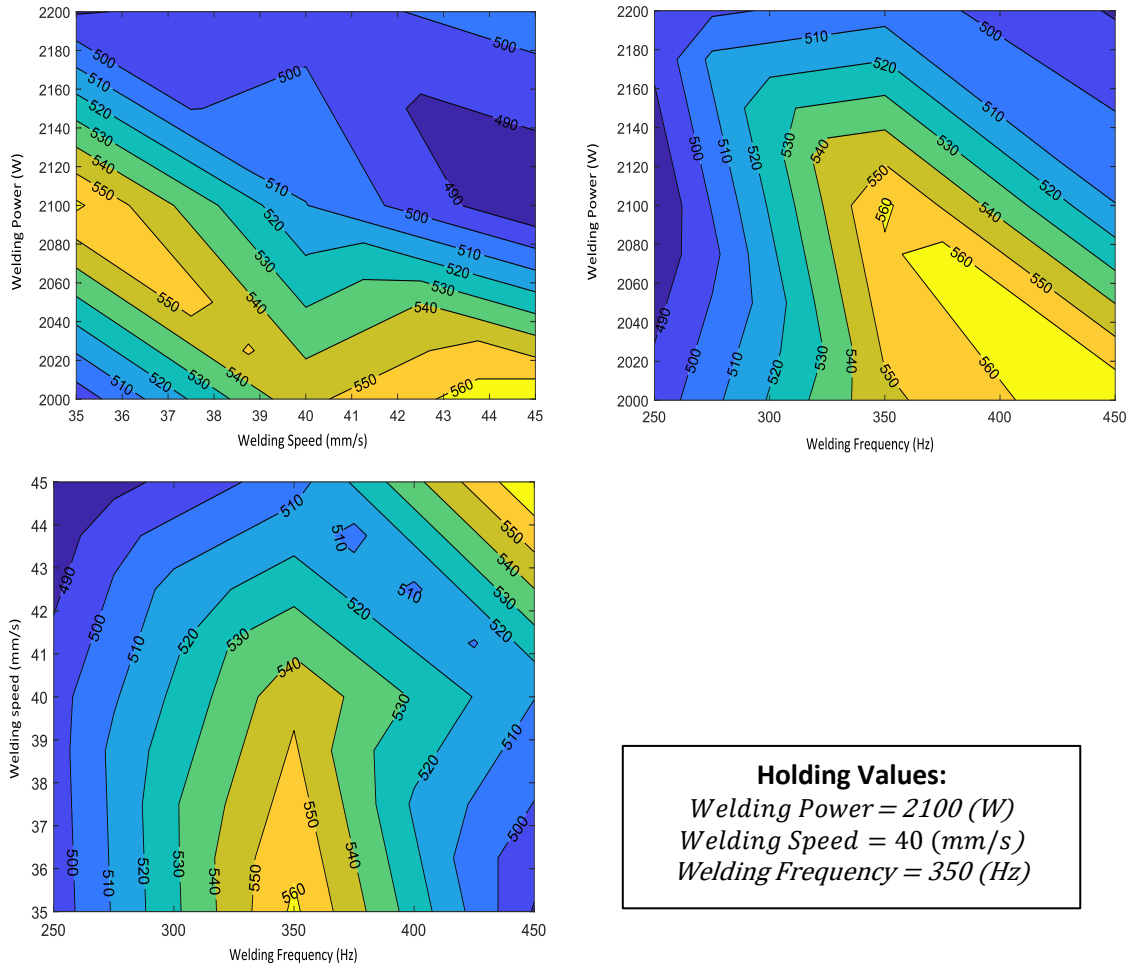


Figure 2.10 Contour Plots of Welding Parameters vs Ultimate Tensile Strength.

2.2.7 CONCLUSIONS

This project aimed to improve the mechanical performance and microstructure of the butt welded AISI 304L plates by using three welding parameters with three different levels and without the use of shielding gas during the oscillating welding process of two patterns, and compare which pattern has better properties. In this project, a several results have been determined that helped to better understand the behavior of the welded metal, and the following was concluded:

- Greater is better, is the criterion was used to analyze the values of the ultimate tensile strength.
- The welds are continuous in the surfaces without cracks, and uniform fish-scale patterns are observed. Some samples display the front appearance as yellow or silvery white. With increasing the laser power, the welding frequency, and decreasing welding speed the front appearances of the welds present color of purple or blue with high spatter, which indicates

that the oxidation of the front appearances is further deepened, and when the weld width is large, that is indicating the higher heat input.

- The HAZ microstructure comprises the austenite structure observed and no trace of secondary phases like carbides was found. The fusion line (between the HAZ and the fusion zone) is characterized by the presence of lightly etched martensite which is in the form of a layer or band and the overlay consists of austenite and ferrite. There are significant differences between the morphology of the fusion line and the HAZ. The microstructure of the WM is composed of planar, cellular, columnar, and equiaxed dendrites growth. The WM region is composed of austenite and a delta ferrite phase.
- Measurements were carried out at many data points to obtain the value of microhardness on WZ, HAZ, and BM. It has been analyzed that the highest microhardness was found beneath the weld-bead in close proximity to the fusion zone for the vertical section and the highest microhardness for the horizontal section was located on the HAZ.
- After analyzing the results of the ultimate tensile strength of the welded samples resulting from conducting nine tests based on Taguchi's design of experiments, it has been found that it is possible to obtain the highest strength values for the square pattern when using a high level of welding frequency in addition to a medium level of welding power.
- The welding power was inversely proportional to the ultimate tensile strength, while the welding speed was directly proportional as well as the welding frequency up to the mean value, then the relation become inversely proportional to the ultimate tensile strength. The contour plots show that the welding power and the welding frequency were the main factors affecting the oscillating welding process for the square pattern.
- After all these studies, the results showed that the square pattern has better mechanical properties than the triangular pattern for a given parametric condition.

2.2.8 REFERENCES

- [1] Balasubramanian, K. R., Shanmugam, N. S., Buvanashakaran, G., & Sankaranarayanan, K. (2008). Numerical and experimental investigation of laser beam welding of AISI 304 stainless steel sheet. *Advances in Production Engineering & Management*, 3(2), 93-105.
- [2] Hao, K., Li, G., Gao, M., & Zeng, X. (2015). Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 77-83.
- [3] Zervas, M. N., & Codemard, C. A. (2014). High power fiber lasers: a review. *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, 20(5), 219-241.
- [4] Overton, G. A. I. L., Noguee, A. L. L. E. N., & Holton, C. O. N. A. R. D. (2014). Laser Marketplace 2014: Lasers forge 21st century innovations. *Laser Focus World*, 5.
- [5] Bachmann, M., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2016). Welding with high-power lasers: Trends and developments. *Physics Procedia*, 83, 15-25.
- [6] Martukanitz, R. P., & Tressler, L. F. (2006). Technology report-Mixing it up-Laser stir welding shows promise for the joining of aluminum alloys. *Industrial Laser Solutions-for Manufacturing*, 21(3), 25-30.
- [7] Spöttl, M., & Mohrbacher, H. (2014). Laser-based manufacturing concepts for efficient production of tailor welded sheet metals. *Advances in manufacturing*, 2(3), 193-202.
- [8] Schweier, M., Heins, J. F., Haubold, M. W., & Zaeh, M. F. (2013). Spatter formation in laser welding with beam oscillation. *Physics Procedia*, 41, 20-30.
- [9] Kuryntsev, S. V., & Gilmutdinov, A. K. (2015). The effect of laser beam wobbling mode in welding process for structural steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9), 1683-1691.
- [10] Müller, A., Goecke, S. F., Sievi, P., Albert, F., & Rethmeier, M. (2014). Laser beam oscillation strategies for fillet welds in lap joints. *Physics Procedia*, 56, 458-466.
- [11] Sun, Z., & Karppi, R. (1996). The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 59(3), 257-267.
- [12] Albert, F., Müller, A., & Sievi, P. (2013). Laserstrahl-Remoteschweißen. *Laser Technik Journal*, 4(10), 28-33.
- [13] Kraetzsch, M., Standfuss, J., Klotzbach, A., Kaspar, J., Brenner, B., & Beyer, E. (2011, October). Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 2011, No. 1, pp. 169-178). Laser Institute of America.
- [14] Meier, O. (2005). Hochfrequentes Strahlpendeln zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen. *Laser Zentrum Hannover eV, Hannover*.
- [15] Müller, M. G. (2002). *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. Herbert Utz Verlag.
- [16] Lehner, C., Reinhart, G., & Schaller, L. (1999). Welding of die-casted magnesium alloys for production. *Journal of Laser Applications*, 11(5), 206-210.
- [17] Katayama, S. (2013). Introduction: fundamentals of laser welding. In *Handbook of laser welding technologies* (pp. 341-345). Woodhead Publishing.

- [18] Rubben, K., Mohrbacher, H., & Leirman, E. (1997, August). Advantages of using an oscillating laser beam for the production of tailored blanks. In *Lasers in Material Processing* (Vol. 3097, pp. 228-241). International Society for Optics and Photonics.
- [19] Schedewy, R., Dittrich, D., Standfuß, J., & Brenner, B. (2008, October). LBW of high stiffness light weight structures generated by scanned fiber laser beams. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 2008, No. 1, p. 332- 339). Laser Institute of America.
- [20] Choi, K. D., Ahn, Y. N., & Kim, C. (2010). Weld strength improvement for Al alloy by using laser weaving method. *Journal of Laser Applications*, 22(3), 116-119.
- [21] Kim, B. H., Kang, N. H., Oh, W. T., Kim, C. H., Kim, J. H., Kim, Y. S., & Pari, Y. H. (2011). Effects of weaving laser on weld microstructure and crack for Al 6k21-T4 alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 27(1), 93-96.
- [22] Vänskä, M., & Salminen, A. (2012). Laser welding of stainless steel self-steering tube-to-tube joints with oscillating mirror. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(4), 632-640.
- [23] Yamazaki, Y., Abe, Y., Kitagawa, A., & Nakata, K. (2013). Fundamental study on the laser welding phenomena with high-frequency laser beam oscillation. In *Proceedings of LAMP2013-the 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Niigata, Japan* (pp. 1-7).
- [24] Bringas, J. E. (2004). Handbook of comparative world steel standards (ASTM DS67B). In *Library of Congress Cataloging*.
- [25] Harvey, P. D. (1982). *Engineering properties of steel*. ASM International.
- [26] Smith, W. F. (1993). *Structure and properties of engineering alloys*. McGraw-Hill.
- [27] Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., & Date, J. Z. (2006). Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. *The Michigan chemical process dynamic and controls open text book, USA*, 2(3), 4.
- [28] Li, X., Xie, J., & Zhou, Y. (2005). Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet. *Journal of materials science*, 40(13), 3437-3443.
- [29] Wang, W., Han, Y., Liu, T., Lu, Y., & Shoji, T. (2020). Effect of surface potential on corrosion behavior of the fusion boundary in the dissimilar welds between 316L stainless steels and Inconel 182 alloy. *Journal of Materials Science*, 55(2), 774-785.
- [30] Inoue, H., & Koseki, T. (2007). Clarification of solidification behaviors in austenitic stainless steels based on welding process. *Nippon Steel Technical Report*, 95(9).
- [31] Yazdian, N., Mohammadpour, M., Razavi, R., & Kovacevic, R. (2018). Hybrid laser/arc welding of 304L stainless steel tubes, part 2–Effect of filler wires on microstructure and corrosion behavior. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 163, 45-54.
- [32] Ha, X. H., Jang, S. W., Bang, W. H., Yoon, U. S., & Oh, K. H. (2002, January). Texture evolution in weld regions of SUS-304 stainless steel and TRIP steel. In *Materials Science Forum (Switzerland)* (Vol. 408, No. 2, pp. 1377-1382).
- [33] Arata, Y., Matsuda, F., & Katayama, S. (1976). Solidification crack susceptibility in weld metals of fully austenitic stainless steels (Report I): fundamental investigation on solidification behavior of fully austenitic and duplex microstructures and effect of ferrite on microsegregation. *Transactions of JWRI*, 5(2), 135-151.

- [34] Kasuya, T., & Hashiba, Y. (2006). Carbon equivalent to assess hardenability of steel and prediction of HAZ hardness distribution. *SHINNITETSU GIHO*, 385, 48.
- [35] El-Bealy, M., & Thomas, B. G. (1996). Prediction of dendrite arm spacing for low alloy steel casting processes. *Metallurgical and materials transactions B*, 27(4), 689-693.
- [36] Morris, J.W. (2001). The influence of grain size on the mechanical properties of steel. Technical Report No. LBNL-47875. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, Berkeley, California, United States of America.
- [37] Anawa, E. M., & Olabi, A. G. (2008). Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components. *Optics & Laser Technology*, 40(2), 379-388.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE L'EFFET DE L'ARGON SUR LES PERFORMANCES MÉCANIQUES DE PLAQUES EN ACIER INOXYDABLE 304L SOUDÉES EN BOUT À BOUT À L'AIDE D'UN FAISCEAU LASER OSCILLANT

3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE

Ce projet présente une étude sur l'effet de l'ajout de gaz argon au processus de soudage par laser oscillant à motif carré sur les propriétés mécaniques du métal soudé AISI 304L lors de la formation de joints bout à bout. Comme l'ont montré dans le projet précédent « Étude Comparative Des Paramètres Du Faisceau Laser Oscillant Sur Des Plaques 304L Soudées Selon Une Configuration De Joint Bout À Bout - Motifs Carré Et Triangulaire », la forme carrée a de meilleures propriétés mécaniques que la forme triangulaire, ce projet sera donc une étude complémentaire du projet précédent. Les tests pour ce projet ont été basés sur la conception de Taguchi et ses résultats ont été analysés sur la base de la méthode ANOVA pour obtenir le meilleur modèle mathématique qui prédit la réponse de manière adéquate dans les limites des paramètres d'entrée. Les résultats ont montré que l'ajout de gaz argon dans le processus de soudage a augmenté de manière significative les valeurs maximales de traction et a amélioré la microstructure et donc les propriétés mécaniques de l'AISI 304L soudé.

Mots clés : AISI 304L, soudage au laser fibre, microstructure, propriétés mécaniques, faisceau laser oscillant, configuration bout à bout, méthode Taguchi, méthode ANOVA, gaz de protection à l'argon.

Ce troisième article, intitulé « Étude De L'effet De L'argon Sur Les Performances Mécaniques De Plaques En Acier Inoxydable 304L Soudées En Bout À Bout À L'aide D'un Faisceau Laser Oscillant », a été co-écrit par moi-même ainsi que par le Professeur Noureddine Barka. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2021 par le *Journal of Materials Engineering and Performance* (JMEP). En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail a été l'essentiel de la recherche de pointe, du développement de la méthode, des tests de performance et de la rédaction de l'article. Le professeur Barka, le deuxième auteur, a fourni l'idée originale. Il a également contribué à la recherche de pointe, au développement de la méthode, à la rédaction et à l'édition de l'article.

3.2 INVESTIGATION OF ARGON SHIELDING GAS ON MECHANICAL PERFORMANCES OF BUTT WELDED 304L PLATES USING OSCILLATING LASER BEAM.

3.2.1 ABSTRACT

This project presents a study on the effect of adding argon gas to the square-pattern oscillating laser welding process on the mechanical properties of AISI 304L welded metal in forming butt joints. As have shown from the previous project "Comparative Study of Oscillating Laser Beam Parameters on 304L Welded Plates in Butt Joint Configuration - Square and Triangular Patterns", that the square shape has better mechanical properties than the triangular shape, so this project will be a supplementary study for the previous project. The tests for this project were based on the design of Taguchi and its results were analyzed based on ANOVA method to obtain the best mathematical model that predicts the response adequately within limits of input parameters. The results showed that the addition of argon gas to the welding process significantly increased the maximum tensile values and enhance the microstructure and thus improved the mechanical properties of the welded AISI 304L.

Key words: AISI 304L, Fiber Laser Welding, Microstructure, Mechanical Properties, Oscillating Laser Beam, Butt Configuration, Taguchi Method, ANOVA Method, Argon Shielding Gas.

3.2.2 INTRODUCTION

The advantages of lasers over conventional light sources are high luminance, superior monochromaticity, and excellent directionality. In other words, lasers have good optical coherence, that is, ideal interfering ability, both in temporal and spatial regions. These features are strongly related to the oscillation mechanism of lasers [1]. The autogenous laser welding of butt joints, the alignment of the sheets should be precise enough to enable gap bridging by the seam and that leads to having a high weld quality and high welded joints strength [2]. Using the filler wire can increase the gap bridging ability, and the filler material can directly affect the metallurgical seam properties. Without the use of a filler wire, it has also been reported that weld seam defects could be reduced by using an oscillating laser beam [3]. In laser welding of stainless-steel sheets without beam oscillation, a big hole was observed, whereby the process was named laser donut welding [4]. The catenoidal shaped hole helps to improve the weld quality in pulsed welding, but in continuous-wave welding, it is recommended to avoid its formation as it could result in discontinuities in the solidified seam [5].

Although laser welding has the advantages of high energy density, low heat input, no mechanical contact and a wide range of weldable materials, the small size of laser beam requires extremely high precision seam for butt welding and the deep laser-induced keyhole is easy to collapse and produce pores. To overcome these issues, various laser welding techniques have been developed, such as laser-arc hybrid welding, double beam laser welding, vibration assisted laser welding, and

vacuum laser welding [6–10]. The oscillating laser welding, which was newly developed in recent years, had more excellent welding characteristics, such as stabilization of process, suppression of spatter and strength improvement [11–14].

Continuous-wave laser welds have an economic advantage by their ability to operate in atmospheric conditions, but they can introduce potential oxygen contamination to the weld and can lead to undesired levels of porosity, spatter, and slag. [15] Therefore, to protect laser welds from oxygen contamination, He, N₂ and Ar inert gases are often used [16], where argon is often the preferred choice based on its lower cost. At this project, Argon shielding gas was used to protect the welding process from the surrounding environmental conditions, and to study its influence on the mechanical properties of the welded butt joints. Katayama [17] showed that a fast solidification rate was the main reason for increasing the crack within laser welds of austenitic stainless steel. Rubben et al. [11] have studied the improvement of laser welding quality with beam oscillating along the weld, by using beam oscillating with a maximum frequency of 200 Hz, the gap tolerance of tailed blanks was increased to 0.3mm, 25% of sheet thickness. Schedewy et al. [18] found that when using a high beam oscillating frequency of 100–200 Hz, fiber laser oscillating welding of carbon steel becomes unstable because the liquid metal is thrown out of the molten pool by the fast-moving laser beam. Kim et al. [19], showed that the shear-tensile strength of the aluminum alloy joint made by disk laser oscillating welding is 29% higher than that of conventional laser welding. Vanska and Salminen [20], supposed that laser oscillating welding could increase the safety factor of industrial applications by widening the weld. Schweier et al. [14], demonstrated that either increasing welding speed or decreasing laser power helps reduce the spatter number during laser oscillating welding. In addition, beam oscillation enables control of the cooling rate, which is beneficial for joining dissimilar and difficult to weld materials like aluminum alloys and high strength steels used in automotive and aerospace industries [21]. When oscillating a single mode laser beam to stabilize the melt pool in laser -GMA hybrid welding of 22MnB5 boron alloyed steel, it was found that the beam influence on bead geometry can be neglected [22]. Studies using an oscillated multimode laser beam in welding lap joint in zinc coated steel and AISI304 presented advantages of welding with small beam diameter at reduced power with oscillation over conventional laser welding, while noting that knowledge of material behavior is crucial for the successful application of this technique [23,24]. Further parameter studies have shown that beam oscillation in welding butt joint improves the gap bridge ability up to three times [25]. Regardless of joint type, the profile of the weld and surface smoothness have direct influence on the weld quality. Detailed understanding of the formation mechanism of the weld geometry is important for utilization of the whole potential that beam manipulation by oscillation is able to provide.

Based on the previous studies that the authors had obtained; laser oscillating welding is playing the main role in stabilizing the welding process and improve the morphologies and the mechanical properties of the welded parts. Until now, the studies related to the weld formation mechanisms and the effects of beam oscillating on weld characterization are few.

This study aims to improve the mechanical and microstructural performance of the improved pattern obtained from the "Comparative Study of Oscillating Laser Beam Parameters of Square and Triangular Pattern on Welded AISI 304L Plates" when welding AISI 304L plates with dimensions of (125×50×2) mm in butt configuration and using a shielding gas during the welding process. One of the stage's unique characteristics is that it takes the shielding gas pressure into account as a separate parameter.

On AISI 304L plates, the tests are conducted. A fiber laser produces a beam with a wavelength of 1070 nm and a maximum power of 3000W, which is utilized in the research. To get the best results with the fewest trials, an experimental design based on the Taguchi technique is selected. The laser's power, welding speed, beam diameter, welding frequency, and shielding gas pressure are all parameters that are taken into account. Microstructure, microhardness, and ultimate tensile strength are the quality characteristics of the weld that are mentioned. After welding, the samples are subjected to a typical metallographic technique that includes cutting, polishing, etching, and microscopic examination. The findings are subjected to an ANOVA statistical analysis in order to determine the impact of the factors under consideration and their contributions to the variation of the different attributes.

This paper aimed to explore the effects of adding Argon shielding gas on the mechanical and microstructural characterization of laser-welded AISI 304L for the square oscillation pattern i.e., ultimate tensile strength, microhardness, and microstructure.

3.2.3 EXPERIMENTAL PROCEDURE

3.2.3.1 Experiment Setup

In this project, two AISI 304L plates, with dimensions of 125 mm × 50 mm × 2 mm were used as workpieces as in [Figure 3.1](#) which shows a welded sample forming a butt joint. The welded plates had then machined to five tensile specimens for the tensile test as in [Figure 3.2](#). The chemical composition and the mechanical properties of the base metal shown in [Table 3.1](#) and [3.2](#) respectively were used in this study [\[26,27\]](#).

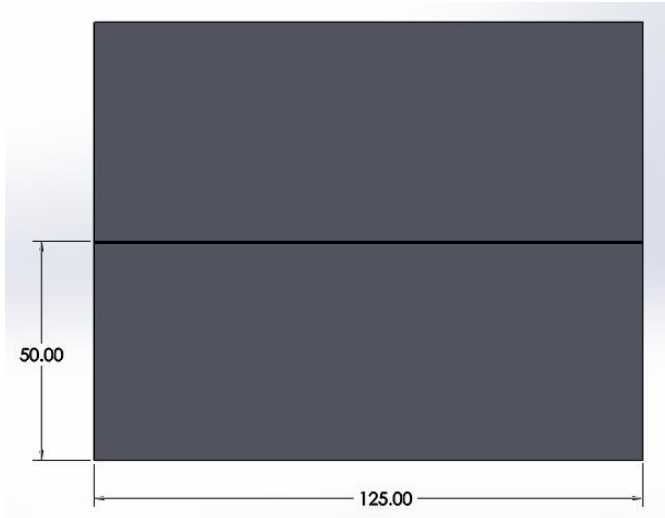


Figure 3.1 Oscillating laser welded plates.

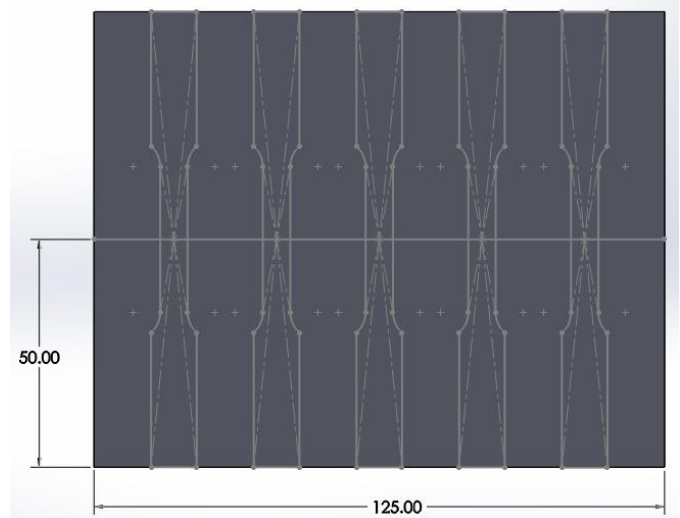


Figure 3.2 Oscillating laser welded sample for tensile test.

Table 3.1 Chemical composition of AISI 304L plates (wt%) [26].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.03%	0.75%	2%	0.045%	0.03%	20%	12%	0.1%	65%

Table 3.2 Mechanical properties of AISI 304L plates [27].

Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation %	Hardness (HV)
210 MPa	564 MPa	58%	161 HV

In this work, AISI 304L was used as the substrate material to investigate the effects of welding parameters on its welding quality. This alloy can be welded even in severe corrosive conditions. In many cases, it eliminates the necessity of annealing weldments except for applications specifying stress relief. It has slightly lower mechanical properties than type 304, and the carbon is kept to 0.03% as maximum. The type 304L is more expensive, and it is considered as weldable stainless steel. Since it does not require post-weld annealing. Therefore, it is extensively used in heavy gauge components. Carbon included in this grade of stainless steel imparts great physical strength at high temperatures [28].

The laser process that used to perform the welding tests for this project with no shielding gas is consists of a FANUC M-710iC robot that directs a light beam from a laser head powered by a fiber laser with a power of 3K W of class 4 emitting at 1070 nm, model IPG YLS-3000-ST2. The HIGHYAG BIMO laser head is equipped with a variable zoom collimator and a fixed focusing lens. Together, this produces circular focal spots of 0.4 mm in diameter, and 200 μm optical fiber was used for laser welding applications on metallic materials. ILV DC-Scanner was used to form the laser beam oscillating patterns. This device makes it possible to scan the surface exposed by

the laser radiation for the purposes of heat treatments or other surface treatments. Its capabilities allow the beam to reach maximum amplitudes of 0.7mm ($\leq 600\text{Hz}$) to 15mm ($\leq 120\text{Hz}$). The two metal samples are clamped near each other forming butt joint during the laser welding process and it is assumed that a zero-gap is obtained. A robotic control panel is used to control the weld path and implement the weld procedure.

Welded joints were visually inspected and samples were sectioned transverse to the welding direction, mechanically polished and etched. Samples were prepared for the metallographic examinations by polishing successively in emery papers to remove the scratches. Marble (HCl (conc.) 50 ml + saturated solution CuSO_4 , in H_2O_2 25 ml) acid's reagent was used for revealing weld microstructure. Furthermore, a micro-hardness survey has been made on flat metallographic specimens across the joints and top to bottom in the weld using Vickers's micro-hardness testing machine (Make: CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0) optical microscope at 100 gf load with 100 μm dot spacing along the vertical and horizontal direction. CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0 was used too to study the microstructure in the fusion and heat-affected zones of the welds.

3.2.3.2 Design of Experiments (DOE)

An experimental design based on the Taguchi technique was used to acquire the data. The experiments were carried out on the basis of four factors, four levels. The experimental procedure includes a series of laser welding tests on AISI 304L stainless steel plates with various combinations of process parameters such as beam power, welding speed, welding frequency, and Argon gas pressure. The laser beam oscillation amplitude has set to be equal to 1.

The experimental procedure consists of a series of tests aimed at developing and evaluating the knowledge base on laser welding of AISI 304L samples after adding shielding gas. Taguchi's L_{16} (4^4) orthogonal array is used in this project and this will allow to perform 16 experiments. Welding Parameters for each condition and response factors are listed in [Table 3.3](#), while the used design of experiments (DOE) is listed in [Table 3.4](#).

Table 3.3 *Welding Parameters for each condition and response factors.*

Symbol	Parameters	Level (1)	Level (2)	Level (3)	Level (4)
P	Welding Power (W)	1900	2000	2100	2200
S	Welding Speed (mm / s)	30	35	40	45
F	Welding Frequency (Hz)	150	250	350	450
A	Argon Pressure (Psi)	20	30	40	50

Table 3.4 *Experimental layout (L₁₆) showing different welding parameters.*

Experimental no.	Factor (P) Welding Power (W)	Factor (S) Welding Speed (mm / s)	Factor (F) Welding Frequency (Hz)	Factor (A) Argon Pressure (Psi)
1	1900	30	150	20
2	1900	35	250	30
3	1900	40	350	40
4	1900	45	450	50
5	2000	30	250	40
6	2000	35	150	50
7	2000	40	450	20
8	2000	45	350	30
9	2100	30	350	50
10	2100	35	450	40
11	2100	40	150	30
12	2100	45	250	20
13	2200	30	450	30
14	2200	35	350	20
15	2200	40	250	50
16	2200	45	150	40

DOE is a technique to define and invest all possible combinations in an experiment involving several factors and to identify the best combination. In this, different factors and their levels are identified. The design of the experiments (DOE) is also useful for combining the factors at appropriate levels, each with the respective acceptable range, to produce the best results while having minimal variation around the optimal results, so that better quality products can be produced, quickly and at a minimal cost.

The Taguchi method achieves the marriage of design of experiments with the optimization of control parameters in order to obtain the best results. Orthogonal Arrays (OA) provide a well-balanced set of experiments (minimum) and Mr. Taguchi's signal-to-noise (S / N) ratios, desired output logarithmic functions, serve as objective functions in optimization, help to data analysis and the signal to noise ratio (S / N) for each level is based on the analysis of the (S / N) ratio. Based on the tensile strength of the welded joint (bigger, better), a higher S / N ratio produces a better-quality value. The standard (S / N) ratio formula for this type of response is: The S / N ratio η is defined as $\eta = -10 \log (M.S.D.)$ Where M.S.D. is the mean square deviation for the output characteristic [29].

$$n_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_{ij}^2} \right] \quad (1)$$

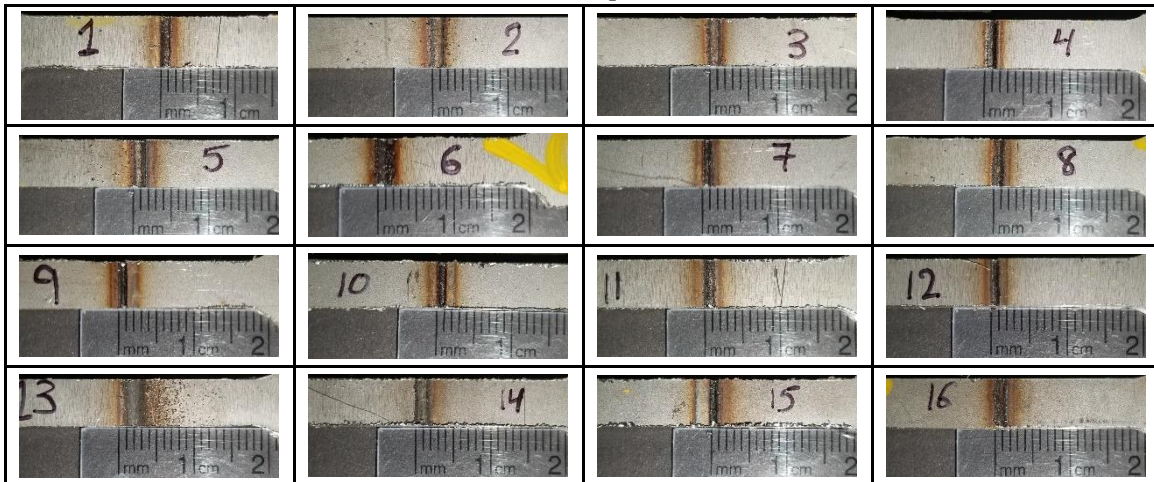
Where (i) is the number of a trial; (Y_{ij}) is the quality of (i ^ th) process and (j ^ th) experience; (n) is the total number of experiments. Here in the present study, our goal is to obtain the ultimate tensile strength after adding the shielding gas and find its influences on the mechanical properties, and compare between having a shielding gas or not, to figure out which case has better results.

Consequently, the (larger is better) the criterion used to optimize the parameters for the ultimate tensile strength of the welded joints. All the experiments were carried out on MTS 810 Material testing system. During the test, the sample is pulled from each end with increasing the load. When a certain load is reached (load at which the sample yield), the sample begins to fail and then break. From the stress-strain curves produced the values of ultimate tensile strength σ_{UTS} are extracted. The failure region in which each sample failed was recorded and all of this information is shown in following sections.

3.2.4 MICROSTRUCTURE, AND MICROHARDNESS TEST RESULTS

The front appearances of the butt weld joints are shown in **Table 3.5**. As shown in **Table 3.5**, the welds are continuous in the surfaces without cracks, and uniform fish-scale patterns are observed. Some samples display the front appearance as yellow or silvery white. By contrast, another sample's front appearance of all the welds is silvery-white in color, indicating effective protection for the joints through gas shielding. With increasing the laser power up to 2200 W, and the welding frequency up to 450 Hz, and decreasing welding speed to 30 mm/s, and the Argon gas pressure to 30 Psi, the front appearances of the welds present a color of purple or blue with high spatter as in welded sample No.13, which indicates that the oxidation of the front appearances is further deepened [30], and as can be seen the weld width is obviously largest than those of other samples, indicating the higher heat input. Spatters also have been noticed in welded samples No.2, No.3, No. 5, No.8 and No.14, which indicates that spatters are occurring in the medium frequency range of (250 Hz -350 Hz).

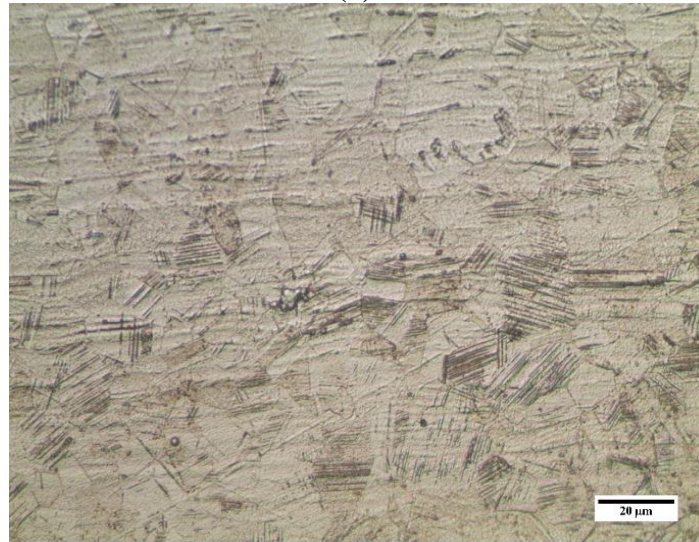
Table 3.5 The front appearance of the laser-welded AISI 304L joints, which represents W1 to W16 samples.



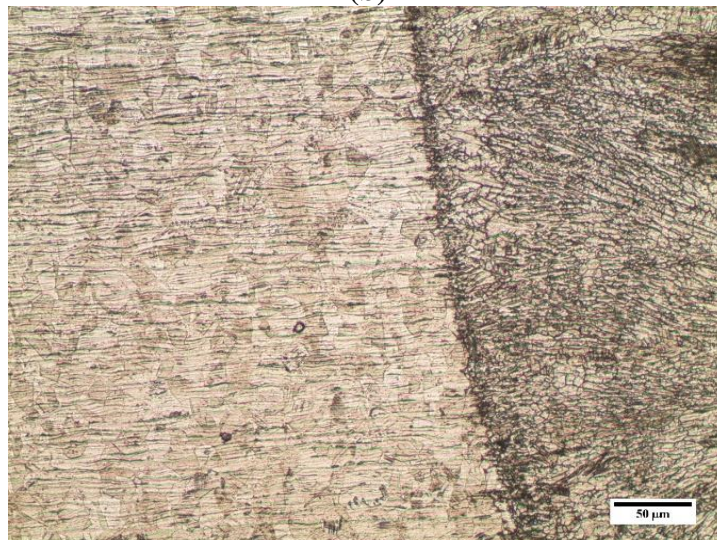
Figures 3.3(a) – 3.3(c) shows the microstructure analysis of the samples tested at room temperature. The HAZ microstructure as in **Figure 3.3(a)** comprises the austenite structure observed and no trace of secondary phases like carbides was found. **Figure 3.3(b)** shows the fusion

line (between the HAZ and the fusion zone) is characterized by the presence of lightly etched martensite which is in the form of a layer or band and the overlay consists of austenite and ferrite. There are significant differences between the morphology of the fusion line and the HAZ, which is in accordance with the available literature [31]. The microstructure analysis in **Figure 3.3(c)**, shows the presence of a dual-phase microstructure at the weld metal consists of a white austenite matrix and dark delta-ferrite as a secondary phase [32]. An increase in the delta-ferrite content leads to an increase in strength and a decrease in ductility at room temperature. It clearly shows the increase in the delta-ferrite content for the shielded square pattern process comparing to the unshielded process.

(a)



(b)



(c)

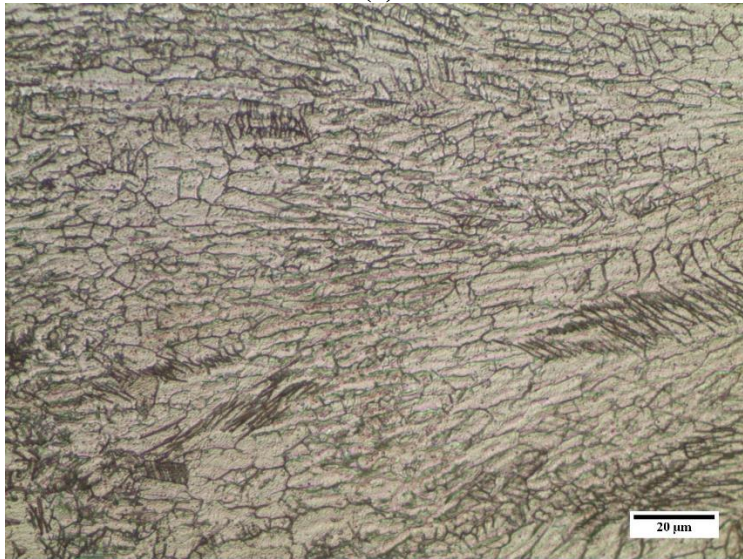


Figure 3.3 *Optical micrographs of shielded square welded AISI 304L showing: (a) HAZ, (b) Fusion Line, and (c) Weld Metal.*

The samples for microhardness were acquired from the thickness section (vertical to the direction of the flow of welded-section) of AISI 304L plates. Microhardness was measured using a CLEMEX Vision PE & Vision Lite 6.0 Vicker's micro-hardness tester using a load of 100 gf with a step range of 100 μm.

The observed microhardness is shown in **Figure 3.4** for samples No. 2, 7, and No. 9. It has been analyzed that the highest microhardness was found close to the weld-bead.

Due to the application of argon (shielding gas) Lack of Penetration (LOP) was not obtained. Modification in microhardness was seen due to alteration in shielding gas pressure. It is found that microhardness increases as the shielding gas pressure are increased from 20 to 50 Psi. This is due to the fact that the shielding gas carries away heat during welding.

This reduces the span of solidification time and enhances the cooling rate. A rapid cooling cycle with a large undercooling will increase the number of nuclei and reduces the size of resulting dendrites. It often leads to the formation of small grains that ultimately results in increased microhardness of weld [33,34].

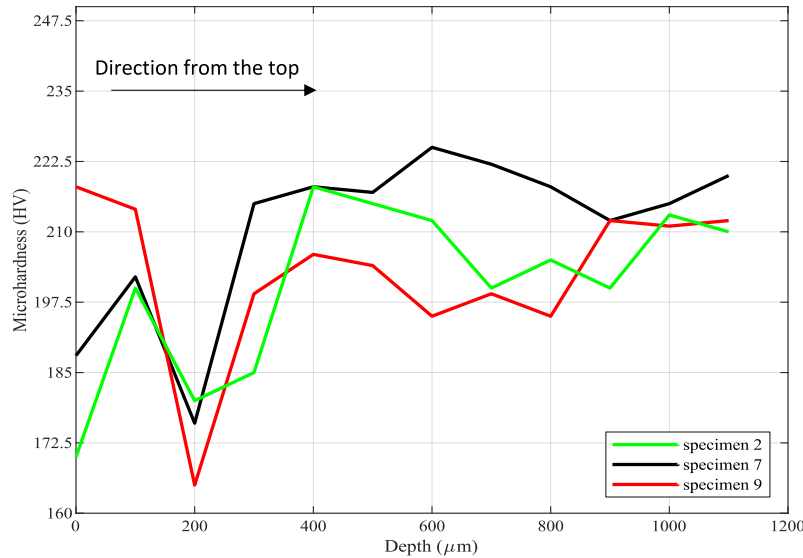


Figure 3.4 Microhardness distribution for specimens No.2, No.7 and No.9.

3.2.5 TENSILE TEST RESULTS

In order to perform the tensile test for the welded specimens, the welded plates had machined to five equal tensile specimens with dimensions of 100 mm x 10 mm x 2 mm as shown in **Figure 3.5**. The measured response for the ultimate tensile strength is listed in **Table 3.6**, Minitab v18 software has been applied for analyzing the measured responses and determining the mathematical models with the best fit. The fitted quadratic polynomial model for response is statistically significant for the prediction within the working range of welding parameters. Therefore, they will be used for further analysis. From the Stress-Strain curves for the welded specimens as shown in **Figure 3.6**, it can be seen that the maximum and minimum ultimate tensile strength for the σ_{UTS} is observed for specimen no. 7 ($P = 2000$ W, $S = 40$ mm/s, $F = 450$ Hz, and $A = 20$ Psi) and sample no. 9 ($P = 2100$ W, $S = 30$ mm/s, $F = 350$ Hz, and $A = 50$ Psi) respectively.

Shielding gases are of considerable significance in the protection of molten metal from atmospheric contamination during welding processes. These gases play an important role in many aspects of welding, including welding characteristics and the microstructure of weldments [35]. Thus, response observation of the ultimate tensile strength of the welded plates refers to that the process carried out using Argon shielding gas has a higher σ_{UTS} than the process without using shielding gas. The increase in the ultimate tensile strength was approximately 1.88% from the unshielded σ_{UTS} .

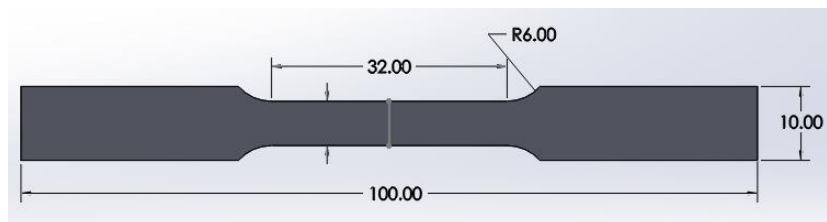


Figure 3.5 Welded tensile test specimen.

Table 3.6 Design of experiment for welding factors and measured experimental results of the

Experimental no.	P (W)	S (mm/s)	F (Hz)	A (Psi)	σ_{UTS} .	
					σ_{UTS} (MPa)	Fracture Point
1	1900	30	150	20	472.054	Weld metal
2	1900	35	250	30	495.440	Weld metal
3	1900	40	350	40	522.949	Weld metal
4	1900	45	450	50	518.559	Weld metal
5	2000	30	250	40	513.243	Weld metal
6	2000	35	150	50	517.089	Weld metal
7	2000	40	450	20	579.986	Weld metal
8	2000	45	350	30	502.485	Weld metal
9	2100	30	350	50	439.515	Weld metal
10	2100	35	450	40	470.437	Weld metal
11	2100	40	150	30	500.418	Weld metal
12	2100	45	250	20	488.191	Weld metal
13	2200	30	450	30	462.652	Weld metal
14	2200	35	350	20	465.295	Weld metal
15	2200	40	250	50	451.669	Weld metal
16	2200	45	150	40	512.089	Weld metal

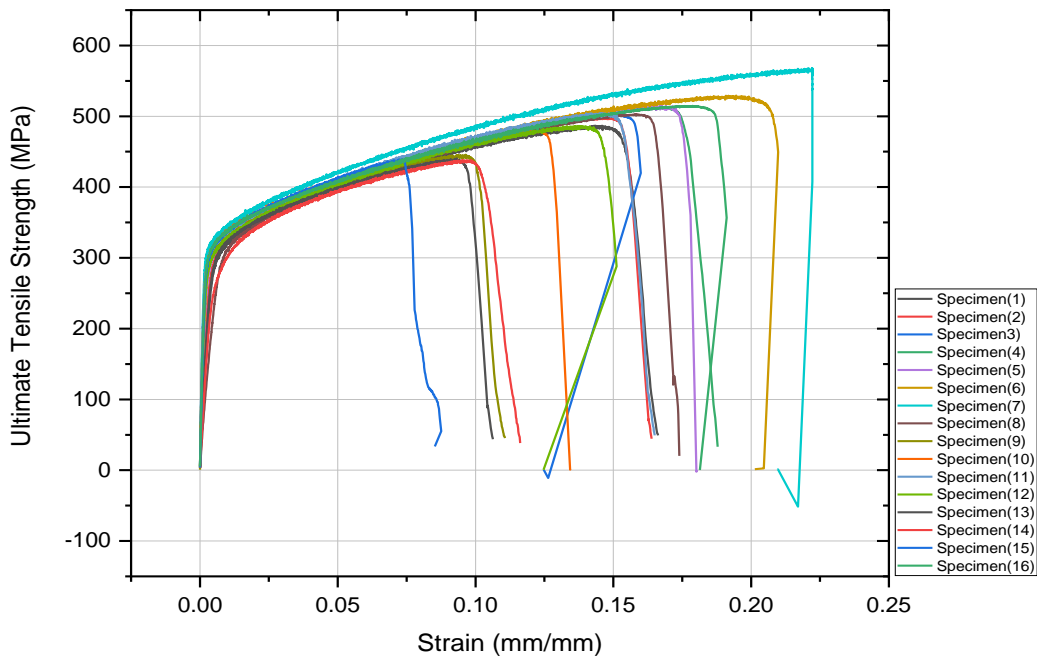


Figure 3.6 Stress-Strain curves for the 16 welded specimens.

3.2.6 STATISTICAL ANALYSIS

3.2.6.1 Tensile Test Results

The purpose of the ANOVA is to investigate which process parameter/s significantly affects the quality characteristic [36]. The test for significance of the regression model and the test for significance on individual model coefficients has been performed using Minitab 18 software. The ANOVA tables also show the other adequacy measure R^2 , adjusted R^2 , and predicted R^2 for response. The associated p-value of less than 0.05 for the model (i.e., p-value < 0.05, at 95% confidence level) indicates that the model terms are statistically significant. The ANOVA indicates that for the ultimate tensile strength model, all the terms that are not significant were eliminated by the step-by-step elimination process to improve the model adequacy [37].

ANOVA is a statistical approach that may be used to evaluate the impact and contribution of each of these parameters on σ_{UTS} values by exposing all relevant process parameters. The ANOVA was taken out in a step-by-step method, which eliminated non-significant variables automatically.

According to the study, the residual is insignificant, accounting for less than 10% of the variation in σ_{UTS} . Welding power, which accounts for about 23% of the total, and welding speed, which account for approximately 19%, are the two factors that have the largest effect on σ_{UTS} . Welding frequency and Argon pressure both have a 0.36 percent and 2% effect on the σ_{UTS} , respectively. In addition, the σ_{UTS} does not represent these little contributions. ANOVA tables were also utilized to evaluate the relevance and effect of design variables on each process's characteristic, demonstrating how σ_{UTS} varies as a function of design parameter alteration. The contribution percentage of the error is minimal, suggesting that no important aspect of the experimental design was overlooked.

The ANOVA result for the reduced quadratic model is shown in **Table 3.7**. The high F-values imply that the term is significant. Values of “prob > F” less than 0.05 indicate model terms are significant. The R^2 value of 97.29%, is the percentage of variation in the response that is explained by the model and it's used to determine how well the model fits the data. The higher the R^2 value, the better the model fits the data. The predicted R^2 of 81.70% determined that our model predicts the response for new observations at a very good level of prediction.

The S value of 8.96870, helped to assess how well the model describes the response, which showed that the lower the value of S, the better the model describes the response.

The prediction error sum of squares (PRESS) of 3259.33, is a measure of the deviation between the fitted values and the observed values and it's similar to the sum of squares of the residual error (SSE). PRESS used to assess our model's predictive ability. Usually, the smaller the PRESS value, the better the model's predictive ability.

Table 3.7 ANOVA for the fitted quadratic polynomial model for UTS.

Source	Df	Contribution	Sum of Squares	Mean Squares	F- Value	P- Value	Remark
P	1	22.49%	1745.7	1745.66	21.70	0.003	Significant
S	1	19.06%	684.7	684.68	8.51	0.027	Significant
F	1	0.36%	4710.2	4710.22	58.56	0.000	Significant
A	1	2.23%	515.2	515.19	6.40	0.045	Significant
P²	1	4.30%	1567.9	1567.93	19.49	0.004	Significant
P×F	1	11.02%	3736.0	3736.00	46.45	0.000	Significant
S×F	1	1.46%	629.8	629.80	7.83	0.031	Significant
S×A	1	5.91%	1623.7	1623.71	20.19	0.004	Significant
F×A	1	30.47%	5427.6	5427.56	67.48	0.000	Significant
Error	6	2.71%	482.6	80.44			
Total	15	100.00%					

R² = 97.29%
Adjusted R² = 93.23%
Predicted R² = 81.70%

S = 8.96870
Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 3259.33

The mathematical model for ultimate tensile strength, which can be used for prediction within same design space, is shown below:

$$\begin{aligned}
 \text{Ultimate Stress (MPa)} = & -7716 + 7.61 \times P - 5.40 \times S + 6.190 \times F - 5 \times A - \\
 & 0.001736 \times P^2 - 0.002473 \times P \times F - 0.01412 \times S \times \\
 & F - 0.2334 \times S \times A + 0.01657 \times F \times A \quad (2)
 \end{aligned}$$

Where P [1900 W; 2200 W], S [30 mm/s; 45 mm/s], F [150 Hz; 450 Hz], and A [20 Psi; 50 Psi].

Figure 3.7 shows the main effect plots for the used welding parameters on the ultimate tensile strength, which indicates the relationship in variation for each parameter with the response.

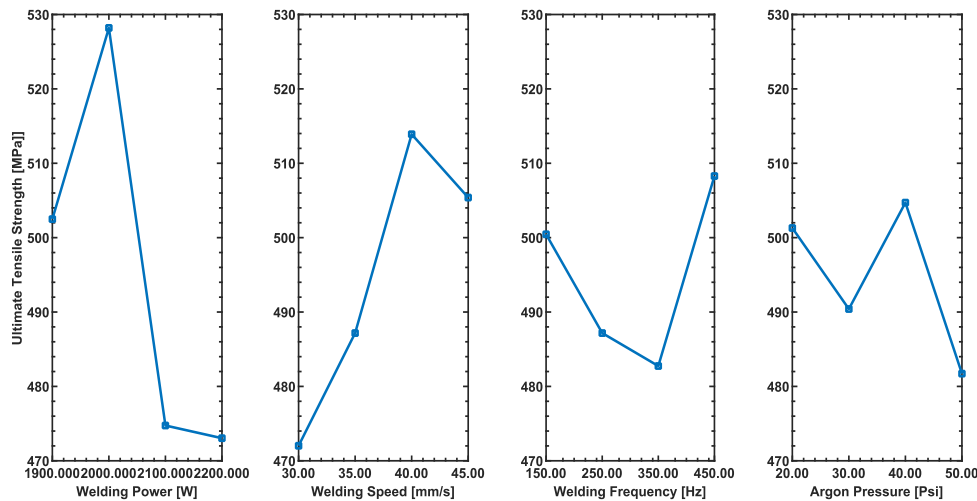


Figure 3.7 Main effect plots for the welding parameters vs. ultimate tensile strength.

The main effect plots of the used welding parameters show that all the welding parameters have a non-linear behavior for the σ_{UTS} . The highest point in all plots is chosen as the most desired condition for maximizing σ_{UTS} , which may be determined by welding power levels between 1900 and 2100 W.

It can be deduced from the **Figure 3.7** that the welding power is directly proportional to the ultimate tensile strength up to 2000 W, then the relation becomes inversely proportional to the response. While the welding speed is directly proportional to the ultimate tensile strength up to 40 mm/s, then as the welding power, the relation becomes inversely proportional to the response. The welding frequency has an inversely proportional relation up to 350 Hz, then the relation becomes directly proportional with the ultimate tensile strength, ending with the Argon pressure that has a directly proportional relation with response only in the range between (30-40) Psi. **Figure 3.7** obviously shows that the most effective welding parameter is the welding power, followed by the welding speed, then the welding frequency and at last the Argon pressure is the less effective welding parameter.

3.2.6.2 RSM of Ultimate Tensile Strength Using ANOVA

The response surface has been created based on the ANOVA prediction model to illustrate the impact of the most important factors on the σ_{UTS} . The results are shown in **Figure 3.8**.

According to the graphs, increasing the welding frequency and welding speed while lowering the welding power and Argon pressure enhances the σ_{UTS} . The significant non-linear impacts on the σ_{UTS} are shown clearly. Higher welding frequency, higher welding speed lower welding power, and lower Argon pressure values may all be used to attain the maximum σ_{UTS} . The highest σ_{UTS} may be achieved by welding power of 1900 to 2000 W, and welding speed between 30 to 40 mm/s. **Figure 3.8** shows contour plots between the welding parameters with the ultimate tensile strength resulting from **Table 3.6**. The brightest regions indicate higher σ_{UTS} values. These higher response values seem to form a tiny ridge locating in different positions for each graph which represents the best welding combinations that result in high σ_{UTS} values.

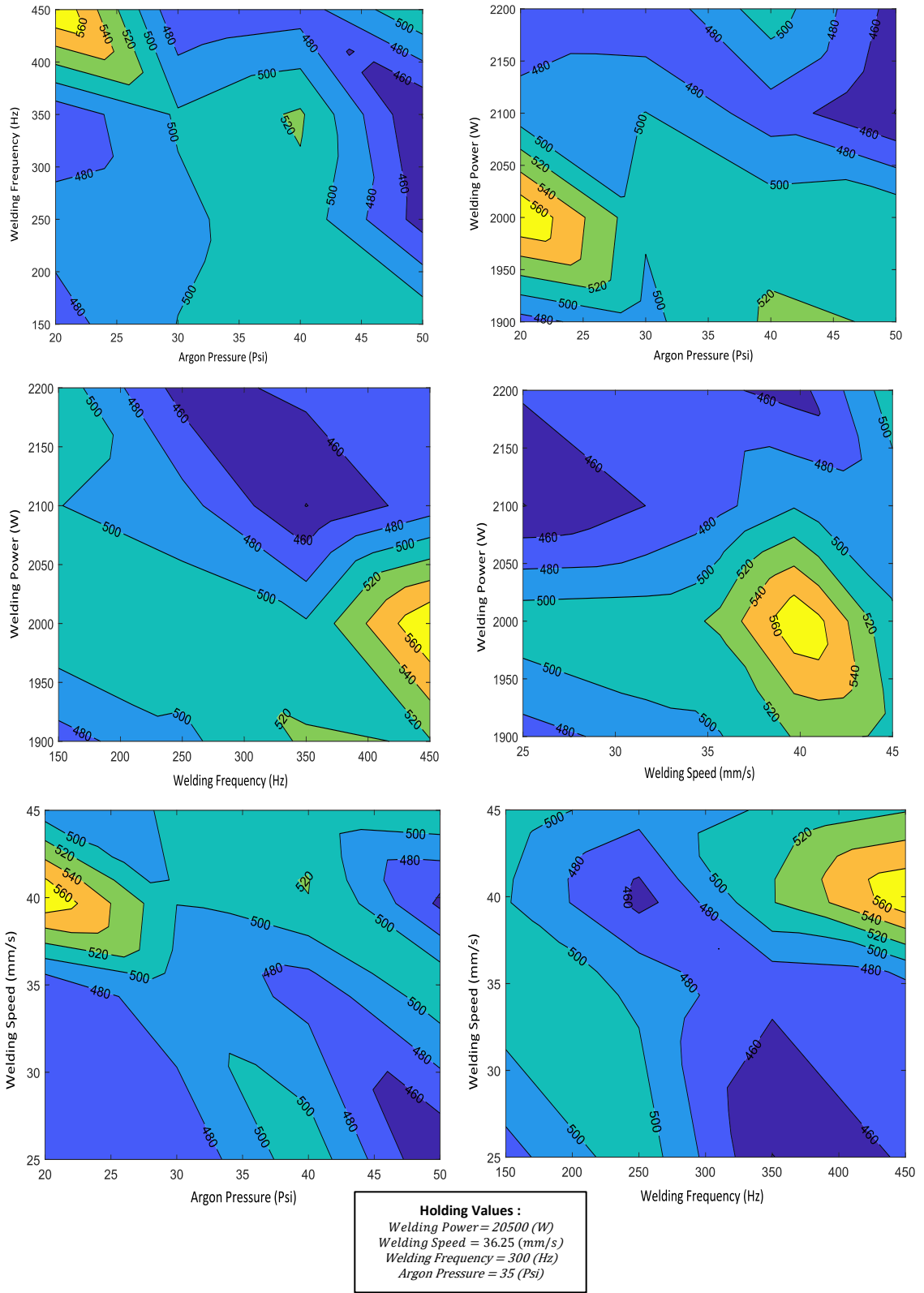


Figure 3.8 Contour Plot of Welding Parameters vs Ultimate Tensile Strength.

3.2.7 CONCLUSIONS

This project aimed to improve the mechanical performance and microstructure of the butt welded AISI 304L plates by using four welding parameters with four different levels and with the use of shielding gas during the oscillating welding process of the square pattern, and compare which case has better properties. In this project, a several results have been reached that helped to better understand the behavior of the welded metal, and the following was concluded:

- Greater is better, is the criterion was used to analyze the values of the ultimate tensile strength.
- The welds are continuous in the surfaces without cracks, and uniform fish-scale patterns are observed. Some samples display the front appearance as yellow or silvery white. By contrast, another sample's front appearance of all the welds is silvery-white in color, indicating effective protection for the joints through gas shielding. With increasing the laser power and the welding frequency, and decreasing welding speed, and the Argon gas pressure, the front appearances of the welds present a color of purple or blue with high spatter, which indicates that the oxidation of the front appearances is further deepened, and as can be seen the weld width is obviously largest than those of other samples, indicating the higher heat input. Spatters also have been noticed, which indicates that spatters are occurring in the medium frequency range.
- The HAZ microstructure comprises the austenite structure observed and no trace of secondary phases like carbides was found. The fusion line (between the HAZ and the fusion zone) is characterized by the presence of lightly etched martensite which is in the form of a layer or band and the overlay consists of austenite and ferrite. There are significant differences between the morphology of the fusion line and the HAZ. The microstructure analysis shows the presence of a dual-phase microstructure at the weld metal consists of a white austenite matrix and dark delta-ferrite as a secondary phase. An increase in the delta-ferrite content leads to an increase in strength and a decrease in ductility at room temperature. It clearly shows the increase in the delta-ferrite content for the shielded square pattern process comparing to the unshielded process.
- The samples for microhardness were acquired from the thickness section (vertical to the direction of the flow of welded-section) of AISI 304L plates. The observed microhardness has been analyzed that the highest microhardness was found close to the weld-bead. Due to the application of argon (shielding gas) Lack of Penetration (LOP) was not obtained. Modification in microhardness was seen due to alteration in shielding gas pressure. It is found that microhardness increases as the shielding gas pressure are increased. This is due to the fact that the shielding gas carries away heat during welding.
- After analyzing the results of the ultimate tensile strength of the welded samples resulting from conducting sixteen tests based on Taguchi's design of experiments, it has been found that it is possible to obtain the highest strength values for the shielded square pattern when using a high level of welding frequency and welding speed in addition to a medium level of welding power and Argon pressure.

- It can be deduced from the main effect plots that the welding power is directly proportional to the ultimate tensile strength up to 2000 W, then the relation becomes inversely proportional to the response. While the welding speed is directly proportional to the ultimate tensile strength up to 40 mm/s, then as the welding power, the relation becomes inversely proportional to the response. The welding frequency has an inversely proportional relation up to 350 Hz, then the relation becomes directly proportional with the ultimate tensile strength, ending with the Argon pressure that has a directly proportional relation with response only in the range between (30-40) Psi. The plots obviously shows that the most effective welding parameter is the welding power, followed by the welding speed, then the welding frequency and at last the Argon pressure is the less effective welding parameter.
- After all these studies, the results showed that the shielded square pattern has better mechanical properties than unshielded process for a given parametric condition.

3.2.8 REFERENCES

- [1] Hanamura, E., Kawabe, Y., & Yamanaka, A. (2007). Laser Oscillation. In *Quantum Nonlinear Optics* (pp. 75-98). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Cho, W. I., Woizeschke, P., & Schultz, V. (2018). Simulation of molten pool dynamics and stability analysis in laser buttonhole welding. *Procedia Cirp*, 74, 687-690.
- [3] Albert, F., & Starcevic, D. (2016, November). Möglichkeiten zur Beeinflussung der Nahtraueheit beim Laserstrahlschweißen von Türen und Klappen aus Aluminium. In *Proceedings of* (Vol. 10).
- [4] Haglund, P., Eriksson, I., Powell, J., & Kaplan, A. (2013). Surface tension stabilized laser welding (Donut laser welding)—A new laser welding technique. *Journal of laser applications*, 25(3), 031501.
- [5] Eriksson, I., Powell, J., & Kaplan, A. F. (2014). Surface tension generated defects in full penetration laser keyhole welding. *Journal of Laser Applications*, 26(1), 012006.
- [6] Shen, J., Li, B., Hu, S., Zhang, H., & Bu, X. (2017). Comparison of single-beam and dual-beam laser welding of Ti–22Al–25Nb/TA15 dissimilar titanium alloys. *Optics & Laser Technology*, 93, 118-126.
- [7] Zhang, C., Gao, M., Wang, D., Yin, J., & Zeng, X. (2017). Relationship between pool characteristic and weld porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 217-222.
- [8] Teichmann, F., Müller, S., & Dilger, K. (2018). On the occurrence of weld bead porosity during laser vacuum welding of high pressure aluminium die castings. *Procedia Cirp*, 74, 438-441.
- [9] Xia, H., Tao, W., Li, L., Tan, C., Zhang, K., & Ma, N. (2020). Effect of laser beam models on laser welding–brazing Al to steel. *Optics & Laser Technology*, 122, 105845.
- [10] Zhang, L. J., Ning, J., Zhang, X. J., Zhang, G. F., & Zhang, J. X. (2015). Single pass hybrid laser–MIG welding of 4-mm thick copper without preheating. *Materials & Design*, 74, 1-18.
- [11] Rubben, K., Mohrbacher, H., & Leirman, E. (1997, August). Advantages of using an oscillating laser beam for the production of tailored blanks. In *Lasers in Material Processing* (Vol. 3097, pp. 228-241). International Society for Optics and Photonics.
- [12] Choi, K. D., Ahn, Y. N., & Kim, C. (2010). Weld strength improvement for Al alloy by using laser weaving method. *Journal of Laser Applications*, 22(3), 116-119.
- [13] Thiel, C., Hess, A., Weber, R., & Graf, T. (2012, May). Stabilization of laser welding processes by means of beam oscillation. In *Laser Sources and Applications* (Vol. 8433, p. 84330V). International Society for Optics and Photonics.
- [14] Schweier, M., Heins, J. F., Haubold, M. W., & Zaeh, M. F. (2013). Spatter formation in laser welding with beam oscillation. *Physics Procedia*, 41, 20-30.
- [15] Elmer, J. W., Vaja, J., Carlton, H. D., & Pong, R. (2015). The effect of Ar and N₂ shielding gas on laser weld porosity in steel, stainless steels, and nickel. *Weld J*, 94(10), 313s-325s.
- [16] *Recommended Practices for Shielding Gases for Welding and Plasma Arc Cutting*, ANSI AWS C5.10-94. 1994. American Welding Society, Miami, Fla.

- [17] Katayama, S. (2013). Introduction: fundamentals of laser welding. In *Handbook of laser welding technologies* (pp. 341-345). Woodhead Publishing.
- [18] Schedewy, R., Dittrich, D., Standfuß, J., & Brenner, B. (2008, October). LBW of high stiffness light weight structures generated by scanned fiber laser beams. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 2008, No. 1, p. 332- 339). Laser Institute of America.
- [19] Kim, B. H., Kang, N. H., Oh, W. T., Kim, C. H., Kim, J. H., Kim, Y. S., & Pari, Y. H. (2011). Effects of weaving laser on weld microstructure and crack for Al 6k21-T4 alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 27(1), 93-96.
- [20] Vänskä, M., & Salminen, A. (2012). Laser welding of stainless steel self-steering tube-to-tube joints with oscillating mirror. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(4), 632-640.
- [21] Kraetzsch, M., Standfuss, J., Klotzbach, A., Kaspar, J., Brenner, B., & Beyer, E. (2011, October). Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 2011, No. 1, pp. 169-178). Laser Institute of America.
- [22] Gao, X. S., Wu, C. S., Goecke, S. F., & Kuegler, H. (2017). Effects of process parameters on weld bead defects in oscillating laser-GMA hybrid welding of lap joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5), 1877-1892.
- [23] Müller, A., Goecke, S. F., Sievi, P., Albert, F., & Rethmeier, M. (2014). Laser beam oscillation strategies for fillet welds in lap joints. *Physics Procedia*, 56, 458-466.
- [24] Hao, K., Li, G., Gao, M., & Zeng, X. (2015). Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 77-83.
- [25] Vollertsen, F., Woizeschke, P., Schultz, V., & Mittelstädt, C. (2017). Developments for laser joining with high-quality seam surfaces. *Lightweight Design worldwide*, 10(5), 6-13.
- [26] Bringas, J. E. (2004). Handbook of comparative world steel standards (ASTM DS67B). In *Library of Congress Cataloging*.
- [27] Harvey, P. D. (1982). *Engineering properties of steel*. ASM International.
- [28] Smith, W. F. (1993). *Structure and properties of engineering alloys*. McGraw-Hill.
- [29] Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., & Date, J. Z. (2006). Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. *The Michigan chemical process dynamic and controls open text book, USA*, 2(3), 4.
- [30] Li, X., Xie, J., & Zhou, Y. (2005). Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet. *Journal of materials science*, 40(13), 3437-3443.
- [31] Wang, W., Han, Y., Liu, T., Lu, Y., & Shoji, T. (2020). Effect of surface potential on corrosion behavior of the fusion boundary in the dissimilar welds between 316L stainless steels and Inconel 182 alloy. *Journal of Materials Science*, 55(2), 774-785.
- [32] Gigović-Gekić, A., Oruč, M., & Vitez, I. (2011). The effect of solution annealing on properties of steel nitronic 60. *Metalurgija*, 50(1).
- [33] Kotecki, D.J. (1978). Welding parameters effects on open arc stainless steel weld metal ferrite. *Welding Journal (AWS)*, 76(1), 109s-117s.
- [34] Morris Jr, J. W. (2001). The influence of grain size on the mechanical properties of steel.

- [35] Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9-12), 1411-1421.
- [36] Kumar, N., Mukherjee, M., & Bandyopadhyay, A. (2017). Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam. *Optics & Laser Technology*, 94, 296-309.
- [37] Anawa, E. M., & Olabi, A. G. (2008). Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components. *Optics & Laser Technology*, 40(2), 379-388.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce mémoire était de conduire une série d'études scientifiques et systématiques pour maîtriser le procédé du soudage au laser appliqué à l'acier inoxydable AISI 304L. Dans cette perspective, le premier objectif de ce mémoire était de réaliser un plan expérimental structuré combiné à des techniques d'analyse statistique éprouvées pour analyser les effets de différents paramètres de processus sur la géométrie du cordon de soudure et ses caractéristiques microstructurelles, qui affectent les propriétés mécaniques des composants soudés en acier inoxydable austénitique de type 304L formant des joints à recouvrement. Le deuxième objectif de ce mémoire était d'étudier les effets des paramètres du modèle de poutre oscillante de deux patrons de soudure carrés et triangulaires de l'AISI 304L sur les caractéristiques de la soudure dans la configuration bout à bout. Finalement, le troisième objectif de ce mémoire était de conduire une étude d'amélioration à partir des résultats de la deuxième étape pour améliorer le comportement mécanique et les performances microstructurelles en utilisant l'argon comme paramètre supplémentaire en plus des paramètres propres au soudage laser.

Dans le cadre de ce travail, une approche pour contrôler les propriétés mécaniques en fonction des paramètres de soudage laser pour les plaques AISI 304L a été proposée. Les paramètres étudiés sont la vitesse de déplacement du point focal, la puissance d'émission de l'énergie laser, le diamètre du point focal du faisceau laser, la fréquence de soudage et la pression du gaz de protection. La contribution importante de cette étude est la définition des règles de contrôle des paramètres de soudage laser pour une prédiction efficace des propriétés mécaniques (microdureté, résistance à la rupture et force de rupture) et de l'aspect de la microstructure (dimensions du cordon de soudure). La complexité de ce développement nécessite la prise en compte du dispositif expérimental à l'échelle du laboratoire (cellule laser, machines de métallographie et machines d'évaluation des propriétés mécaniques), pour la validation des formules, des résultats et des modèles.

Pour réaliser des courbes de niveau avec des intervalles de réponse variables en fonction des paramètres de soudage laser, l'analyse expérimentale RSM (response surface method), qui est une technique d'analyse statistique, est utilisée dans ce travail car elle a l'avantage d'être facile à appliquer et simple à interpréter.

Les étapes de ce projet ont montré que les paramètres de soudage ont un effet significatif, tout comme les positions et les schémas de soudage, sur les propriétés mécaniques et la microstructure des plaques AISI 304L, de sorte que le métal soudé présente des propriétés différentes. La méthode Taguchi a été utilisée pour concevoir les expériences en fonction du nombre de paramètres et du nombre de niveaux utilisés pour chacun d'eux.

Les résultats ont été analysés par la méthode ANOVA afin d'obtenir le meilleur modèle mathématique qui prédit les nouvelles observations avec un très bon niveau de prédiction. L'objectif de la première étape est d'analyser les effets des différents paramètres du processus sur la géométrie du cordon de soudure et ses caractéristiques microstructurelles des composants soudés en acier inoxydable austénitique de type 304L formant des joints à recouvrement. Les résultats de la première étape ont montré que :

- Lors de l'utilisation de trois paramètres de soudage (puissance de soudage, vitesse de soudage et diamètre focal) avec trois niveaux chacun pour souder deux plaques d'AISI 304L dans la position de chevauchement sans utiliser de gaz de protection, les valeurs de contrainte les plus élevées peuvent être obtenues en utilisant le plus haut niveau de puissance de soudage en plus d'une faible vitesse de soudage ;
- L'utilisation d'une faible vitesse de soudage indique une pénétration complète de la soudure et l'utilisation de niveaux élevés de celle-ci conduit à l'apparition d'éclaboussures dans des proportions différentes le long de la ligne soudée;
- Les résultats des contraintes ont été analysés par la méthode ANOVA et un modèle mathématique a été obtenu qui peut être utilisé pour prédire dans le même espace de conception;
- Toutes les zones de rupture lors de l'essai de traction se trouvaient dans la zone soudée;
- La section transversale de la microstructure pour chaque échantillon soudé a été étudiée, et en analysant la largeur du cordon de soudure, il a été constaté que la vitesse de soudage est inversement proportionnelle à la largeur du cordon de soudure, et elle est considérée comme le premier et principal paramètre affectant la largeur du cordon de soudure. De même, le diamètre focal est inversement proportionnel à la largeur du cordon de soudure, et la question diffère de la puissance de soudage en ce qu'elle est directement proportionnelle à la largeur du cordon de soudure;
- Les graphiques d'effet principal de la force de traction ultime permettent de conclure que la puissance de soudage est directement proportionnelle à la force de traction ultime, tandis que la vitesse de soudage est inversement proportionnelle à la force de traction ultime ainsi qu'au diamètre focal. De plus, il est évident que les paramètres de soudage les plus efficaces sont la puissance de soudage, suivie de la vitesse de soudage, et enfin le diamètre focal;
- Après avoir analysé les résultats des forces de traction ultimes des échantillons soudés, il a été constaté que les valeurs de force les plus élevées peuvent être obtenues en utilisant un niveau élevé de puissance de soudage en plus d'un niveau moyen de vitesse de soudage ;
- Les micrographies optiques des échantillons soudés de l'AISI 304L montrent que le ZAC contient une structure d'austénite monophasée observée et aucune trace de phases secondaires comme les carbures n'a été trouvée. La ligne de fusion (entre la ZAC et la zone de fusion) est caractérisée par la présence de martensite légèrement attaquée qui se présente sous la forme d'une couche ou d'une bande et le recouvrement est constitué d'austénite et de ferrite. Il existe des différences significatives entre la morphologie de la ligne de fusion et celle de la ZAC. La morphologie de la zone entre l'acier inoxydable 304L et la soudure est différente. La zone de soudure de l'AISI 304L qui possède une matrice austénitique avec des colonies orientées de dendrites de ferrite delta. L'augmentation de la ferrite delta dans la soudure va améliorer l'intégrité mécanique du joint soudé;
- A la fin de cette étape, la microdureté des échantillons soudés à travers la zone de fusion (direction horizontale) a été analysée. Les mesures ont été effectuées à de nombreux points de données pour obtenir la valeur de la microdureté sur zone de soudure (ZS), zone affectée par la chaleur (ZAC) et métal de base (MB). Il a été analysé que la microdureté la plus élevée a été trouvée sur la ZS.

Par conséquent, il était nécessaire de passer à une autre étape avec un nouveau paramètre de soudage et une position de soudage différente pour étudier son effet sur les propriétés mécaniques et la microstructure des échantillons soudés. La deuxième étape de cette recherche a utilisé un faisceau laser oscillant dans deux motifs différents (carré et triangulaire) pour former une configuration bout à bout, et également sans utiliser de gaz de protection pendant le processus de soudage. L'objectif principal de cette étape était de trouver le meilleur modèle de soudage entre le modèle carré et le modèle triangulaire du faisceau laser oscillant lorsqu'il est exposé aux mêmes conditions et paramètres de soudage. Les résultats de la deuxième étape ont montré que :

- Le motif carré présentait de meilleures propriétés mécaniques et valeurs de contrainte que le motif triangulaire, et le montant de l'augmentation de la valeur de la résistance à la rupture la plus élevée entre les deux motifs était de 6,5%;
- Par conséquent, les résultats du modèle carré ont été analysés pour obtenir le modèle mathématique requis, et les tracés de contour ont montré la relation entre les paramètres de soudage et leur effet sur les valeurs de résistance à la traction ultime du métal soudé;
- Les échantillons pour la microdureté ont été acquis à partir de la section d'épaisseur (verticale à la direction du flux de la section soudée) et de la section de longueur (horizontale à la direction du flux de la section soudée) des plaques AISI 304L. Les mesures ont été effectuées sur de nombreux points de données pour obtenir la valeur de la microdureté sur ZS, ZAC et MB. Il a été analysé que la microdureté la plus élevée a été trouvée sous le cordon de soudure à proximité de la zone de fusion pour la section verticale et la microdureté la plus élevée pour la section horizontale a été localisée sur le ZAC;
- Il a été constaté que les valeurs de résistance à la traction ultime atteignent leur valeur maximale en utilisant des niveaux élevés de fréquence de soudage. C'est le paramètre principal affectant les valeurs de résistance à la traction ultime, puis il est suivi par la puissance de soudage et à la fin, la vitesse de soudage est le paramètre le moins affectant le processus de soudage;
- La microstructure du joint bout à bout se compose de la ZAC, du métal de soudure (MS) et de la zone d'interface (ligne de fusion). La microstructure ZAC comprend la structure austénitique observée et aucune trace de phases secondaires comme les carbures n'a été trouvée. La ligne de fusion (entre la zone ZAC et la zone de fusion) est caractérisée par la présence de martensite légèrement attaquée qui se présente sous la forme d'une couche ou d'une bande et le recouvrement est constitué d'austénite et de ferrite. Il existe des différences significatives entre la morphologie de la ligne de fusion et celle de la ZAC. La microstructure de la zone MS est composée d'une croissance de dendrites planes, cellulaires, colonnaires et équiaxes. La région MS est composée d'austénite et d'une phase ferrite delta;
- Des mesures de microdureté ont été effectuées à de nombreux points de données pour obtenir la valeur de la ZS, de la ZAC et de la MB. Il a été analysé que la microdureté la plus élevée a été trouvée sous le cordon de soudure à proximité de la zone de fusion pour la section verticale et que la microdureté la plus élevée pour la section horizontale était située sur la ZAC;
- Toutes les zones de rupture lors de l'essai de traction se trouvaient dans la zone soudée;
- Les apparences frontales des échantillons soudés à ce stade montrent que les soudures sont continuées dans les surfaces sans fissures, et des motifs uniformes sont observés sur le motif

en écailles de poisson. Les apparences frontales de certains échantillons varient avec des couleurs différentes telles que le jaune, le blanc argenté, le bleu ou le violet.

Après ce qui a été réalisé dans la deuxième étape de ce projet, l'objectif de la dernière étape est d'étudier l'effet d'un nouveau paramètre important dans tout processus de soudage, qui est le gaz de protection (argon). Le modèle carré pour la troisième étape a été choisi car il a de meilleures propriétés mécaniques que le modèle triangulaire. La pression du gaz de protection a été ajoutée comme nouveau paramètre et a élargi la plage des quatre paramètres de sorte que chacun d'eux a quatre plages différentes. Les résultats de la troisième étape ont montré que :

- L'ajout de gaz de protection à l'argon au processus de soudage permet d'isoler le processus des conditions atmosphériques environnantes et contribue ainsi de manière significative à réduire sa susceptibilité aux facteurs d'oxydation environnants;
- L'ajout de gaz de protection à l'argon a contribué à augmenter les valeurs de résistance à la traction ultime du métal soudé de 1,88 %;
- Toutes les zones de rupture lors de l'essai de traction se trouvaient dans la zone soudée;
- Les courbes de niveau ont montré la relation entre les paramètres de soudage et la valeur de la résistance à la rupture, et il a été constaté que la puissance de soudage a le premier effet parmi les paramètres de soudage, suivie par la vitesse de soudage, puis la fréquence de soudage, et enfin, la pression d'argon a le moins d'effet sur le processus de soudage;
- La microstructure ZAC comprend la structure austénitique observée et aucune trace de phases secondaires comme les carbures n'a été trouvée. La ligne de fusion (entre le ZAC et la zone de fusion) est caractérisée par la présence de martensite légèrement attaquée qui se présente sous la forme d'une couche ou d'une bande et le recouvrement est constitué d'austénite et de ferrite. Il existe des différences significatives entre la morphologie de la ligne de fusion et celle de la ZAC. L'analyse de la microstructure montre la présence d'une microstructure à deux phases au niveau du métal de soudure, composée d'une matrice d'austénite blanche et de delta-ferrite foncée comme phase secondaire. Une augmentation de la teneur en delta-ferrite entraîne une augmentation de la résistance et une diminution de la ductilité à température ambiante. Il montre clairement l'augmentation de la teneur en delta-ferrite pour le procédé à motif carré blindé par rapport au procédé non blindé;
- Les échantillons pour la microdureté ont été acquis à partir de la section d'épaisseur (verticale à la direction du flux de la section soudée) des plaques AISI 304L. La microdureté observée a été analysée et la microdureté la plus élevée a été trouvée près du cordon de soudure. En raison de l'application d'argon (gaz de protection), le manque de pénétration (LOP) n'a pas été obtenu. La modification de la microdureté a été observée en raison de l'altération de la pression du gaz de protection. On constate que la microdureté augmente lorsque la pression du gaz de protection augmente. Ceci est dû au fait que le gaz de protection évacue la chaleur pendant le soudage;
- Après avoir analysé les résultats de la résistance à la traction ultime des échantillons soudés résultant de la réalisation de seize tests basés sur le plan d'expériences de Taguchi il a été constaté que les valeurs de résistance les plus élevées pour le motif carré blindé peuvent être obtenues en utilisant un niveau élevé de fréquence et de vitesse de soudage en plus d'un niveau moyen de puissance de soudage et de pression d'argon ;

- On peut déduire des graphiques d'effet principal que la puissance de soudage est directement proportionnelle à la résistance à la traction ultime jusqu'à 2000 W, puis la relation devient inversement proportionnelle à la réponse. La vitesse de soudage est directement proportionnelle à la résistance ultime à la traction jusqu'à 40 mm/s, puis comme la puissance de soudage, la relation devient inversement proportionnelle à la réponse. La fréquence de soudage a une relation inversement proportionnelle jusqu'à 350 Hz, puis la relation devient directement proportionnelle à la résistance ultime à la traction, en terminant par la pression d'argon qui a une relation directement proportionnelle avec la réponse uniquement dans la gamme entre (30-40) Psi;
- D'après les apparences frontales des échantillons soudés à ce stade, On peut voir que les soudures se poursuivent dans les surfaces sans fissures, et que des motifs uniformes sont observés sur le motif en écailles de poisson.
- Comme dans la deuxième étape de ce projet, les apparences avant des échantillons soudés sont apparues dans différentes couleurs, y compris jaune, blanc argenté, bleu et violet, et la présence de la couleur blanc argenté a indiqué la protection efficace des joints par le gaz de protection;
- Les éclaboussures étaient évidentes dans la plupart des échantillons soudés, et elles variaient entre les éclaboussures légères et lourdes en fonction de la fréquence de soudage, les éclaboussures étant trouvées dans la gamme de fréquence moyenne de (250 Hz -350 Hz).

Sur la base de ce qui a été atteint précédemment dans les trois étapes, il s'avère que le processus de soudage au laser a été affecté par plusieurs facteurs qui, à leur tour, ont affecté les propriétés mécaniques et microstructurelles du métal soudé de manière claire et significative, ce qui permet de conclure ce qui suit :

- La portée de chaque paramètre de soudage a été déterminée après une série d'expériences initiales pour comprendre les paramètres critiques associés au soudage laser de l'AISI 304L avec des positions différentes à chaque fois;
- La méthode Taguchi a été utilisée pour concevoir les expériences en fonction du nombre de paramètres de soudage utilisés à chaque étape et du nombre de niveaux pour chacun. Plus grand est meilleur est le critère qui est utilisé pour analyser les résultats des valeurs de la résistance à la traction ultime, tandis que le critère de plus petit est meilleur est utilisé pour analyser les résultats des valeurs de la largeur du cordon de soudure;
- L'ANOVA a été utilisée pour construire un modèle mathématique qui prédit efficacement et précisément les valeurs dans le même espace de conception;
- Des tableaux d'ANOVA ont été utilisés pour connaître la contribution de chaque paramètre de soudage sur le processus de soudage et pour étudier son effet sur les valeurs de réponse séparément;
- En élargissant la gamme des paramètres de soudage à quatre plages différentes, on peut constater que les résultats des contraintes ont été plus influencés par les plages utilisées, de sorte qu'ils ont donné des résultats décrivant plus précisément leur influence avec les paramètres utilisés;
- L'ajout d'un nouveau paramètre de soudage a eu un effet efficace sur l'augmentation de la valeur la plus élevée de la résistance à la traction ultime qui a été atteinte dans les trois étapes;

- La modification de la position de soudage a clairement contribué à l'augmentation des valeurs de contrainte maximale, la position bout à bout présentant de meilleures propriétés mécaniques que la position de chevauchement;
- L'ajout de gaz argon a permis d'isoler le processus de soudage de l'atmosphère environnante, augmentant ainsi l'efficacité du processus de soudage;
- L'utilisation d'un faisceau laser oscillant a eu une incidence sur l'augmentation de la qualité du processus de soudage, car il a produit de meilleures valeurs de contrainte que l'utilisation d'un faisceau laser continu non oscillant.

Ces résultats ouvrent la voie aux futures recherches sur le soudage au laser, y compris les applications à haut volume impliquant l'automatisation, comme dans l'industrie automobile, ainsi que le soudage, le découpage, le perçage et le traitement de surface d'une large gamme de matériaux d'ingénierie, permettant des études statistiques pour améliorer les paramètres et prédire la meilleure performance mécanique des pièces soudées dans diverses configurations. Ces résultats peuvent inspirer les chercheurs et les ingénieurs à comparer et à améliorer les recherches passées à de nouvelles recherches intégrant de nouveaux concepts de soudage à l'avenir.