

Optimisation du processus de texturation des surfaces métalliques par faisceau laser

A. Soveja*^{1,2}, J.M.Jouvard¹, E.Cicală², G.Duffet¹, D.Grevey¹, B.Martin¹

¹ Institut Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 5209,
Département Interface et Réactivité des Matériaux, Université de Bourgogne,
IUT Le Creusot, 12 rue de la Fonderie - 71200 LE CREUSOT

² Université « Politehnica » Timișoara, Faculté de Génie Mécanique,
P-ta Victoriei, Nr 2, 300006 Timisoara, Romania

*a.soveja@iutlecreusot.u-bourgogne.fr

Résumé :

Le processus de texturation par laser représente la réalisation de motifs micro/macro géométrique, plus ou moins réguliers sur une surface métallique, à l'aide d'un faisceau d'énergie concentré dans un spot très fin. Obtenir des indicateurs de performances optimaux, oblige à étudier et comprendre les interactions physico-chimiques apparues dans la zone d'impact faisceau laser - matière.

Cet article présente l'étude expérimentale et numérique sur le processus de texturation par laser pulsé de l'alliage de titane TA6V. Dans une première partie l'influence des paramètres opératoires sur les indicateurs des performances a été quantifiée par la méthodologie des plans des expériences. En analysant les résultats on a observé que la productivité et la qualité de la surface texturée dépend de l'énergie et de la fréquence des impulsions. Afin de déterminer les corrélations entre les paramètres opératoires et les fonctions objectifs, des modèles empiriques ont été établis.

Abstract:

Laser texturing process is characterized by realisation of micro/macro geometrical pattern on metallic surface which can have or not a regular form. In order to obtain the better performance indicators, it is necessary to study and understand the physical-chemical phenomenon which occurs during laser materials interaction.

This article presents the experimental and numerical study of TA6V alloy texturing using a pulsed laser. In the first part of article the influence of operating parameters on the performance indicator, is quantified by using an experimental design method. Analysing the results it is observed that the pulse energy and the frequency of pulses are most influencing the performance indicators. In order to find the correlation between the operating parameters objectives functions, mathematical expressions were established.

Mots-clefs :

Laser Nd:YAG ; texturation ; optimisation

1 Introduction

Des indicateurs de performances tels que la qualité, la fiabilité ou la réduction du prix de fabrication représentent des motivations importantes pour lesquels le choix d'un procédé laser peut s'imposer face au choix d'un procédé conventionnel de fabrication. Pendant ces dernières années, le laser est utilisé dans plusieurs domaines, mais il reste essentiellement utilisé pour des applications industrielles de base [Wetter *et al.* (1995)] comme la découpe, le perçage, le soudage, le traitement de surface et le marquage.

L'utilisation de l'attaque chimique ou de l'électroérosion engendre une multitude d'inconvénients telles que : la manipulation d'acide ou de diélectriques, l'émission de solvant dans l'atmosphère, le besoin d'une bonne conductivité électrique du matériau et de faibles productivités (vitesse d'attaque entre 0,025-0,1 mm/min) afin d'obtenir une bonne qualité de surface.

En revanche l'utilisation du laser, l'apparition de têtes galvanométrique complètement vectorisé et la possibilité de transmettre le faisceau par fibre optique, permet d'éliminer ces inconvénients. Cependant il faut identifier et déterminer les paramètres opératoires qui ont une influence significative sur les indicateurs des performances [Almeida *et al.* (2006)]. Ces dernières années plusieurs études ont été réalisées sur différents matériaux, afin de déterminer l'influence des paramètres opératoires, pour mieux maîtriser et optimiser le processus d'usinage [Meijer (2004), Lallemand *et al.* (2000), Kaldos *et al.* (2004)].

Le but de notre étude est de mettre en évidence les limites du procédé laser de texturation de l'alliage de titane et trouver le domaine optimal qui nous permet d'obtenir la maximisation de la productivité tout en minimisant la rugosité de la surface.

2 Modélisation empirique du processus de texturation

Le procédé de la texturation par laser consiste dans l'utilisation d'un faisceau d'énergie concentré en un spot très fin qui permet de modifier la surface d'un matériau par un processus d'ablation de matière afin de lui donner l'aspect surfacique désiré.

Lors d'un impact laser, une fine couche de matériau passe à l'état liquide, puis est vaporisée en surface formant une plume de matière ablatée [Jouvard *et al.* (2007)]. Cette plume exerce une surpression sur la couche de métal fondu. Le métal liquide est repoussé vers les bords de l'impact. Après la fin de l'impulsion, le métal fondu tend à revenir à sa place. Lorsque l'on observe au microscope la surface de l'échantillon ayant subi un impact unique, on observe très peu de changement. Le déplacement du faisceau permet de constituer des lignes parallèles. La fréquence de tir, la vitesse de déplacement du faisceau et l'interligne induisent un recouvrement important des impacts. Les paramètres opératoires du traitement sont la fréquence de tir, l'énergie d'un impact laser, la vitesse de déplacement du faisceau et l'interligne.

En tenant compte du grand nombre de paramètres et de la complexité des phénomènes physiques intervenants durant l'interaction laser-matière, nous avons fait appel à la méthode des plans d'expériences [Montgomery (1991)]. Cette technique permet, en réduisant le nombre d'essais, de caractériser l'importance des effets produits par les facteurs d'influence sur la fonction objectif. Le programme expérimental, mis en place, est spécifique pour la méthode de surface de réponse [Montgomery (1991)] et permet d'avoir la corrélation entre les facteurs d'influence et la fonction objectif, décrit par un polynôme de deuxième degré :

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

où: \tilde{y} est la fonction objectif, x_{ij} les valeurs codifiées correspondant aux facteurs d'influence, n est le nombre de facteurs d'influence et b_0 , b_i , b_{ii} , b_{ij} les coefficients de régression.

En se basant sur des essais préliminaires et sur des simulations numériques d'un impact laser [Jouvard *et al.* (2006), Soveja *et al.* (2007)], nous avons choisi comme facteurs d'influence la fréquence des impulsions et l'énergie par impulsion. Le niveau du point central et les intervalles de variations pour les facteurs d'influence sont présentés dans le tableau 1. La vitesse de balayage du faisceau laser et l'interligne entre deux passes sont fixés à une valeur constante ($v = 12\text{mm/s}$; $It = 30\ \mu\text{m}$).

TABLEAU 1 – Les coordonnées des facteurs d'influence

Paramètre	Valeur codifiée	Valeurs physiques	
		$x_1 \leftrightarrow f$ [Hz]	$x_2 \leftrightarrow E$ [mJ]
Point central	0	11500	4
Intervalle de variation	Δj	1000	1
Niveau inférieur	-1	10500	3
Niveau supérieur	+1	12500	5
Bras négatif	-1,41	10090	2,6
Bras positif	+1,41	12910	5,4

L'étude a été réalisée en utilisant un laser de marquage Nd:YAG déclenché ($\lambda=1,064\mu\text{m}$) équipé d'une tête galvanométrique. Les essais ont été réalisés sur des échantillons de mêmes géométries (figure 1a), grâce à un balayage du faisceau laser dans la zone à usiner. Pour obtenir une empreinte aisément caractérisable, le balayage a été reproduit 6 fois en alternant des passages à 0° et à 90° (figure 1b). Le matériau choisi pour cette étude est un alliage de titane TA6V (tableau 2).

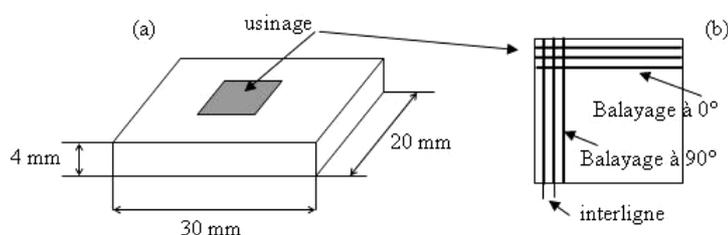


FIG. 1 – Principe des échantillons : (a) géométrie, (b) balayage croisé

TABLEAU 2 – Composition chimique de l'alliage de titane TA6V

Alliage	Éléments d'alliage (% masse)						
	Al	V	O	Fe	H	C	N
TA6V	5,5...6,75	3,5...4,5	0,2 (max)	0,4 (max)	0,015 (max)	0,1 (max)	0,05 (max)

L'optimisation du processus de texturation par laser, suppose de maximiser la productivité et de minimiser la rugosité de la surface. Afin d'atteindre nos objectifs nous avons choisi comme fonction objectif le rapport entre le débit volumique (D_v) et la rugosité de surface (S_a).

Pour chaque essai, l'échantillon a été pesé avant et après traitement et le temps d'usinage a été enregistré. Ceci nous a permis de calculer le débit massique d'usinage et ultérieurement, le débit volumique d'usinage. Les informations concernant la rugosité de la surface ont été obtenues à l'aide d'un microscope optique 3D. Celui-ci permet la reconstruction de la surface en trois dimensions à partir de laquelle nous pouvons faire la mesure de la rugosité.

Afin de caractériser la surface on a fait appel à un paramètre permettant une analyse tridimensionnelle de la surface. Celui-ci fait partie du lot « Birmingham 14 » mise au point pour la première fois dans les années '90 par K. Stout [Dong *et al.*(1994), Stout *et al.* (1995)]. Le paramètre choisi (S_a) est complémentaire du R_a (ISO 4287) et il est défini par l'équation (2).

La matrice-programme utilisée pour la mise en place des expériences et les résultats obtenus sur la fonction objectif sont présentés dans le tableau 3.

$$S_a = \frac{1}{a} \iint_a |Z(x, y)| dx dy \quad (2)$$

TABLEAU 3 – Matrice programme de l'étude et les résultats sur la fonction objectif

Essai	Facteurs d'influence – valeurs codifiées		Fonction objectif
	Fréquence	Energie	Dv/Sa [$\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$]
1	-1	-1	155,37
2	-1	1	376,87
3	1	-1	247,30
4	1	1	481,72
5	-1,41	0	236,52
6	1,41	0	403,51
7	0	-1,41	135,28
8	0	1,41	401,86
9	0	0	351,73
10	0	0	355,93
11	0	0	340,89
12	0	0	437,18
13	0	0	439,11
14	0	0	390,23
15	0	0	373,46
16	0	0	392,22

L'amplitude des effets provoqués par les facteurs d'influences sur la fonction objectif peut être estimée à partir de la figure 2. Une première analyse des résultats montre que pour un niveau de confiance de 95%, les deux facteurs ont une influence significative sur la fonction objectif. Le facteur le plus influent est l'énergie par impulsion.

En faisant appel à la méthode des moindres carrés, nous avons calculé la valeur des coefficients des régressions. La signifiante des coefficients des régressions, pour le même niveau de confiance, a été vérifiée avec la méthode d'analyse de variance (ANOVA). Les valeurs des coefficients sont présentées dans le tableau 4.

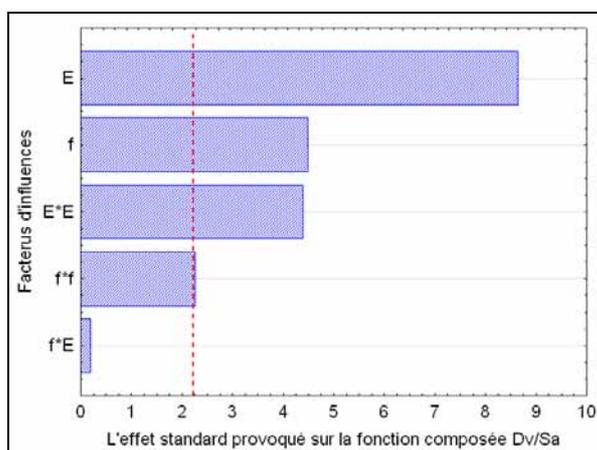


FIG. 2 – Amplitudes des effets provoqués par les facteurs d'influence sur la fonction objectif

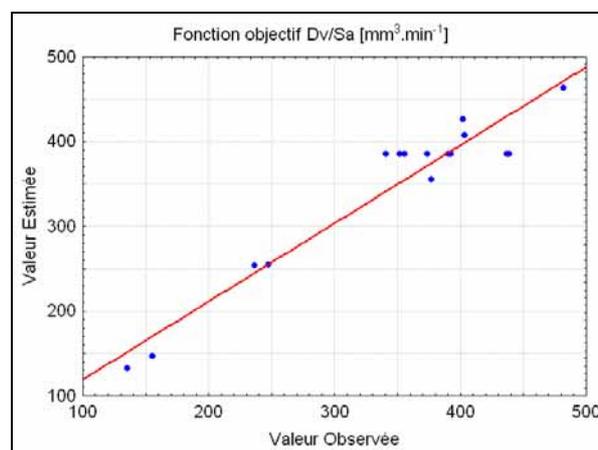


FIG. 3 – Corrélation entre les valeurs estimées et mesurées de la fonction objectif

TABLEAU 4 – Les valeurs estimées pour les coefficients des régressions

Coefficient du modèle	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Valeur estimée	304,83	54,11	104,11	-27,15	-52,87	3,23

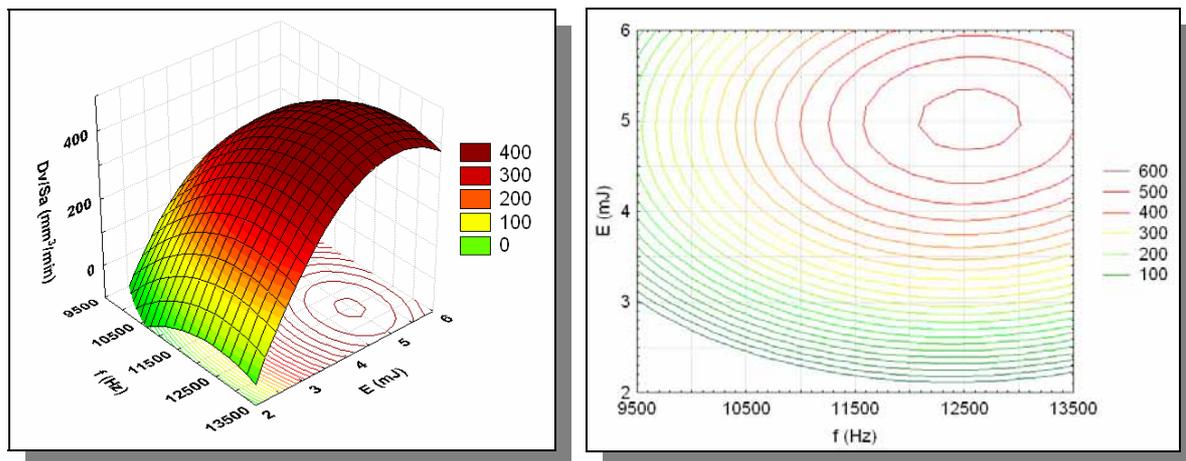
Ces résultats permettent d'établir la corrélation entre les facteurs d'influence (f , E) et la fonction objectif (D_v/S_a), décrit par le modèle empirique suivant :

$$y = 304,83 + 54,11x_1 + 104,11x_2 - 27,15x_1^2 - 52,87x_2^2 \quad (3)$$

où : y est le rapport entre le débit volumique et la rugosité de la surface, x_1 et x_2 étant les facteurs d'influence (respectivement la fréquence et l'énergie).

On peut constater une bonne concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées à l'aide du modèle (figure 3). La valeur du coefficient de corrélation correspondant au modèle ($R^2 = 0,93$) nous permet de dire que, pour un niveau de confiance de 95%, 93% des résultats obtenus peuvent être estimés par le modèle présenté ci-dessus.

En générale, dans le cas de moules d'injection, une surface est caractérisée par des rugosités comprises entre 4 μm (textures fines) et 30 μm (textures grossiers) [Arino *et al.* (2004)]. Dans notre cas nous voulons obtenir la plus grande productivité tout en minimisant la rugosité de la surface. Ceci peut se réaliser en maximisant la fonction objectif (D_v/S_a). La méthode choisie nous permet d'obtenir la surface de réponse ainsi que des informations concernant le domaine optimal. La variation de la fonction objectif avec les facteurs d'influences est présentée dans la figure 4.



a) Surface de réponse

b) Courbe d'isoréponse

FIG. 4 – Variation de la fonction objectif avec les facteurs d'influences

En analysant la surface de réponse et les courbes d'isoréponse nous pouvons déterminer les conditions optimales de travail. On peut observer que les valeurs maximales de la fonction objectif sont obtenues pour une fréquence comprise entre 11500 et 13500 Hz et une énergie par impulsion comprise entre 4 et 6 mJ. Pour une fréquence de 12500 Hz et une énergie de 5 mJ nous obtenons la valeur maximale de la fonction objectif : $D_v/S_a = 481,72 \text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$. Dans ce cas le débit volumique obtenu est de $2,4 \text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ pour une rugosité de $4,5 \mu\text{m}$.

3 Conclusions

Nous avons utilisé une approche statistique pour mettre en évidence les influences des paramètres opératoires. Pour les conditions expérimentales étudiées, nous avons réalisé une hiérarchisation de ceux-ci par rapport à leur importance sur la fonction objectif (D_v/S_a). On observe que l'énergie par impulsion est nettement le facteur le plus influent suivi par la

fréquence et que les interactions entre les facteurs n'ont aucune influence sur la fonction objectif.

Le modèle empirique de deuxième degré, présenté dans cette étude, permet d'estimer la corrélation entre les facteurs d'influence et la fonction objectif avec une certitude de 93%. La méthode de surface de réponse nous a permis d'établir les valeurs optimales des paramètres opératoires ($E = 5\text{mJ}$; $f = 12500\text{ Hz}$) pour une vitesse de balayage et une interligne maintenues constantes, pour tous les essais, respectivement à 12mm.s^{-1} et $30\mu\text{m}$.

Cette étude a démontré que le processus de texturation par faisceau laser peut être considéré comme une technique fiable, qui peut remplacer avec succès les techniques traditionnelles de texturation telle que l'attaque chimique.

Références

- Almeida, I.A., de Rossi, W., Lima, M.S.F., Beretta, J. R., Nogueira, G.E.C., Wetter, N.U., Vieira Jr., N. D. 2006 Optimization of titanium cutting by factorial analysis of pulsed Nd :YAG laser parameters. *J. Mat. Proc. Techn.* **179**, 105-110
- Arino, I., Kleist, U., Barros, G.G., Johansson, P., Rigdahl, M. 2004 Surface Texture Characterisation of Injection-Molded Pigmented Plastics, *Polymer Eng. and Science* **44**, 1615-1626;
- Dong, W.P., Sullivan, P.J., Stout, K.J. 1994 Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties, *Wear* **178**, 29-43;
- Jouvard, J.M., Soveja, A., Pierron, N. 2006 Thermal modelling of metal surface texturing by pulsed laser Proc. Comsol Multiphysics Conference Paris, France;
- Jouvard, J.M., Soveja, A., Lavis, L. 2007 Traitement de surface métallique induit par faisceau laser Nd:YAG Q-switch de marquage: Modélisation d'un impact laser. Proc.13^{èmes} Journées Internationales de Thermique 2007, Albi, France ;
- Kaldos, A., Pieper, H.J., Wolf, E., Krause, M. 2004 Laser machining in die making - a modern rapid tooling process. *J. Mat. Proc. Techn.* **155-156**, 1815-1820 ;
- Lallemand, G., Jacrot, G., Cicala, E., Grevey, D.F, 2000 Grooving by Nd:YAG laser treatment, *J. Mat. Proc. Techn.* **99**, 32-37 ;
- Meijer, J. 2004 Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities. *J. Mat. Proc. Techn.* **149**, 2-17 ;
- Montgomery, D.C. 1991 Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, Singapore;
- Soveja, A., Jouvard, J.M., Martin, B., Grevey, D. 2007 Texturation de surface métallique induit par faisceau laser Nd:YAG impulsif: Modélisation d'un impact laser. Proc. Congrès SFT les Embiez, France ;
- Stout, K. J., Blunt, L. A. 1995 Application of 3D topography to bioengineering, *J. Mat. Proc. Techn.* **2**, 219-229;
- Wetter, N.U., de Rossi, W. 2000 in : S.P. Morato (Ed.), ICS Lectures on Industrial Applications of Lasers, Unido Publication, Vienna ;