

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/29649964>

# Traitement de surface métallique induit par faisceau laser Nd:YAG Q-switch de marquage : modélisation d'un impact laser

Article · August 2007

Source: OAI

CITATIONS

2

READS

152

3 authors:



Jouvard Jean-Marie

University of Burgundy

48 PUBLICATIONS 400 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



A. Soveja

Université Toulouse II - Jean Jaurès

21 PUBLICATIONS 142 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Luc Lavisse

University of Burgundy

27 PUBLICATIONS 249 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Optimization of cutting and color marking of metals by laser [View project](#)



Shot-peening and high temperature oxidation [View project](#)

# TRAITEMENT DE SURFACE METALLIQUE INDUIT PAR FAISCEAU LASER Nd:YAG Q-SWITCH DE MARQUAGE : MODELISATION D'UN IMPACT LASER

Jean-Marie JOUVARD<sup>1\*</sup>, Adriana SOVEJA<sup>1,2</sup>, Luc LAVISSE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Carnot de Bourgogne, UMR 5209, Département IRM, Equipe LTm  
IUT Le Creusot, 12 rue de la Fonderie - 71200 LE CREUSOT

<sup>2</sup> Université « Politehnica » Timișoara, Faculté de Génie Mécanique, Timisoara, Romania

\* auteur correspondant : [jmj@iutlecreusot.u-bourgogne.fr](mailto:jmj@iutlecreusot.u-bourgogne.fr)

**Résumé :** Nous intéressons à la modélisation des phénomènes physiques intervenant lors du traitement des matériaux par un faisceau laser Nd:YAG impulsif. Deux applications industrielles sont étudiées: le procédé de la texturation par laser et le procédé de coloration de surface par laser.

## 1. INTRODUCTION

Dans ce travail nous intéressons à la modélisation des phénomènes physiques intervenant lors du traitement des matériaux par un faisceau laser Nd:YAG de durée d'impulsion de 200 ns à 500 ns (laser de marquage).

Deux applications industrielles sont étudiées:

- Le procédé de la texturation [1-2] 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 un aspect de surface spécifique. Pour ceci nous utilisons un laser Nd:YAG de marquage (source laser Nd:YAG Q-switch pompée par diode) équipé d'une tête galvanométrique (permettant le déplacement du faisceau). Nous effectuons une succession d'impact laser. 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.

- Le procédé de coloration de surface [3,4] par laser est basé sur un procédé similaire de balayage de la surface par un faisceau laser de densité de puissance plus faible. Dans ce cas nous observons une coloration de surface due à un mécanisme d'oxydation par l'air ambiant. Cependant l'intérêt majeur de ce procédé est que les oxydes de titane renforcent notablement les propriétés tribologiques du titane et de ses alliages.

## 2. MODELE THERMIQUE

De nombreux paramètres interviennent dans le processus. Les paramètres opératoires du traitement sont la fréquence de tir ( $f$ ), l'énergie d'un impact laser ( $E$ ), la vitesse de déplacement du faisceau ( $v_{las}$ ) et l'interligne ( $It$ ). Le diamètre de la tache laser peut être considéré comme constante. La durée d'impulsion dépend des paramètres de fréquence et d'énergie. La puissance moyenne et puissance crête peuvent se déduire des paramètres précédents. Cependant du fait du double balayage de la surface et des paramètres opératoires ( $f$ ,  $v_{las}$ ,  $It$ ) le recouvrement des impacts est important. On définit la fluence ( $F$ ) comme énergie totale reçue par unité de surface (tenant compte du recouvrement des impacts).

Afin de mieux comprendre les processus, nous nous intéressons dans cette étude à l'interaction laser-matière lors d'un impact laser. Nous avons développé un modèle numérique unidimensionnel [5]. Le but est de déterminer les dimensions de la couche de liquide et la

quantité de matière ablatée. La comparaison des résultats avec les caractéristiques de l'impulsion laser nous permet de justifier l'utilisation d'un modèle 1D.

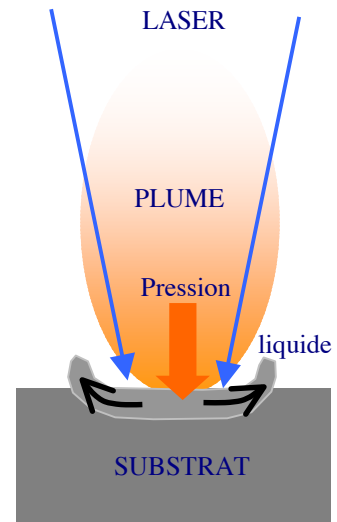
## 2.1. Phénoménologie

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. 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. Mais la répétition des tirs conduit à des modifications de surface importantes: ablation de matière dans le cas de la texturation ou échauffement superficiel induisant une insertion d'oxydes dans la proche surface.

Notre but est de comprendre les phénomènes à l'origine de ces modifications de surface.

- Quelle est la quantité de matière ablatée à chaque tir ? Lors d'un cycle, la matière liquide rejetée sur le bord de l'impact réussit-elle à revenir à sa place initiale ? La solidification a-t-elle lieu avant ce retour, formant ainsi un cratère ?

- Comment s'effectue l'insertion des oxydes ? A-t-on un simple processus de diffusion ou insertion sous l'action de la pression de recul due à l'extinction de la plume



## 2.2. Action du faisceau laser

D'après une étude préliminaire effectuée en utilisant le modèle analytique unidimensionnel du mur semi-infini soumis à un flux constant, il sort que:

- Les profondeurs affectées thermiquement sont faibles comparées au rayon du faisceau, ceci justifie l'utilisation d'un modèle unidimensionnel pour l'étude du phénomène thermique.

- La température de surface calculée est supérieure à la température de vaporisation. On a donc vaporisation du matériau en surface. Dans le modèle thermique, il faut tenir compte du fait que la vapeur s'échappe pour former une plume. Cette éjection de vapeur a physiquement comme conséquence:

- La surface reste à la température de vaporisation. Ceci implique que l'énergie du faisceau n'est plus intégralement transmise au matériau, mais qu'une partie de cette énergie sert à vaporiser la matière, qui ensuite quitte la surface avec une certaine énergie cinétique.

- La vapeur éjectée a comme effet de créer une surpression sur la couche de liquide. Ce liquide est alors repoussé sur les bords de la zone irradiée. Ceci implique la nécessité d'un modèle à deux dimensions (symétrie axiale) et la prise en compte de la déformation de la surface (utilisation de la méthode ALE).

## 2.3. Modèle thermique 1D

Notre but est de modéliser un cycle de tir, c'est à dire le chauffage en surface durant la phase d'irradiation, puis le refroidissement sous l'action du milieu ambiant. La modélisation numérique est effectuée à l'aide du logiciel Comsol-Multiphysics®. Dans cette première étape, nous avons utilisé un modèle unidimensionnel [5,6] de diffusion de la chaleur par conduction,

dans lequel le changement de phase solide-liquide est pris en compte. La géométrie est un segment, dont la partie inférieure reste à la température initiale  $T_0$ . Les propriétés physiques du matériau et les détails de la procédure numérique font l'objet de la référence [5].

Durant la phase d'irradiation, on applique le flux jusqu'à atteindre la température de vaporisation ( $T_{vap}$ ). Puis, afin de tenir compte de l'éjection de vapeur, nous considérons que la surface reste à la température de vaporisation (référentiel lié à la surface réelle de l'isotherme de vaporisation). Une partie du flux permet de maintenir la surface à  $T_{vap}$  et le reste du flux correspond à la vaporisation de la matière. Pour maintenir la surface à la température  $T_{vap}$ , la méthode retenue consiste à considérer une condition limite d'échange avec un milieu de température  $T_{vap}$ . Cette condition peut s'interpréter physiquement comme l'échange d'énergie avec la plume.

Les principaux résultats de cette simulation numérique sont les suivants:

- La profondeur maximale de liquide est de l'ordre de 1,6  $\mu\text{m}$ . Elle varie peu pour la gamme de paramètres étudiés.
- La durée nécessaire à la solidification est de l'ordre d'une microseconde. En comparant avec la période de répétition des impulsions (0,1 à 0,3 ms), on peut considérer qu'entre deux impulsions laser, la surface revient à l'état solide.

### 3. ANALYSE DU PROCEDE

#### 3.1. Texturation d'une surface de Titane

Dans une première étape, nous avons étudié l'optimisation du procédé laser de texturation dans le cadre d'un plan d'expérience [7]. L'étude est réalisée dans le cas de la texturation d'une surface d'un alliage de Titane (TA6V). L'énergie varie de 3 à 6 mJ. La durée d'impulsion varie de 200 à 300 ns. Les deux caractéristiques à optimiser (fonctions objectives) sont la quantité de matière ablatée (le débit volumique  $D_v$  exprimé en  $\text{mm}^3/\text{min}$ ) et la rugosité (paramètre  $S_a$  exprimé en  $\mu\text{m}$ ). Le but est de trouver un compromis entre un débit volumique maximum et une rugosité minimale (rapport  $S_a/D_v$ ). Nous avons montré que dans la gamme de fonctionnement, les fonctions objectives ne dépendent de façon significative que de la fréquence et l'énergie. Nous avons ainsi pu définir des paramètres optimaux [7]. Le but de la présente étude est de comprendre d'un point de vue physique pourquoi ces paramètres sont optimaux.

Le tableau 1 présente un échantillon des résultats issus du plan d'expérience [7]. Les paramètres optimaux correspondent à un rapport  $D_v/S_a$  maximum. La simulation numérique permet de déterminer la durée nécessaire pour atteindre la vaporisation  $t_v$ , que l'on peut comparer à la durée de l'impulsion laser  $\tau_{laser}$ . En utilisant un modèle [8] développé par Semak, on peut déterminer la pression de recul  $P_{recul}$  due à l'éjection de matière vaporisée.

- Dans le cas de l'essai 1, le temps nécessaire pour atteindre la température de vaporisation est très proche de la durée d'impulsion. L'ablation se fait uniquement par déplacement de matière liquide.

- Dans le cas de l'essai 3, on atteint rapidement la vaporisation. La quantité de matière ablatée et la profondeur de l'impact sont plus importantes. La pression de recul due à l'éjection de matière, et donc l'éjection du liquide vers les bords de l'impact, sont importantes. Il y a ablation de la matière par un processus beaucoup plus violent. Par conséquent on a un débit volumique ( $D_v$ ) important. Mais la profondeur des impacts induit une irrégularité de la surface obtenue (mauvaise rugosité).

- l'essai 2 correspond à un compromis entre le débit de matière et la rugosité. La vaporisation débute au milieu de l'impulsion. Il y a éjection de matière sous l'action d'une pression de recul suffisamment importante. Mais les impulsions créent des impacts peu profonds, ce qui implique une surface plus régulière.

Paramètres opératoires	numéro de l'essai			1	2	3
	puissance crête	$\tilde{P}$	( kW )	10,9	14,5	28,4
	durée d'impulsion	$\tau_{\text{laser}}$	( ns )	275	276	211
Résultats expérimentaux	Débit volumique	$D_v$	( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	1,1	1,7	2,8
	Rugosité	$S_a$	( $\mu\text{m}$ )	33	15	158
		$D_v / S_a$	( $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )	33	113	18
Simulation numérique	temps vaporisation	$t_v$	( ns )	262	150	39
	Pression recul	$P_{\text{recul}}$	( $10^5 \text{ Pa}$ )	7	19	166

Tableau 1 : Etude expérimentale de la texturation de surface

### 3.2. Coloration d'une surface de Titane

Dans cette étude nous avons effectué une étude de la coloration en fonction des paramètres de traitement. Nous avons obtenu différentes colorations allant du violet très lisse, différentes nuances de bleu, jusqu'à un dépôt jaune ou blanc pulvérulent. Le tableau 2 montre l'évolution des couleurs lorsque la densité de puissance augmente. Une observation au microscope montre que la surface est de moins en moins lisse et homogène. On constate une évolution vers la présence d'agrégat en surface. L'étude de l'état de surface pour une même densité de puissance, lorsque l'on augmente le taux de recouvrement, montre une évolution vers une surface recouverte d'un dépôt de poudre blanche ( $\text{TiO}_2$ ).

Etude en fonction de l'énergie : $f = 9500\text{Hz}$ , $v_{\text{las}} = 10 \text{ mm/min}$ , $It = 50 \mu\text{m}$						
énergie	E	( mJ )	0,88	1,87	3,09	4,42
durée d'impulsion	$\tau_{\text{laser}}$	( ns )	460	330	270	280
densité de flux	$\varphi$	( $10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	0,24	0,71	1,42	1,96
fluence	F	( $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	128	272	448	642
couleur			violet	bleu	gris bleu	jaune
Etude en fonction du recouvrement : $f = 15500\text{Hz}$ , $E = 1,24 \text{ mJ}$ , $\varphi = 3,56 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$						
vitesse	$v_{\text{las}}$	( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	20	10	6	3
interligne	It	( $\mu\text{m}$ )	25	25	25	25
fluence	F	( $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	295	590	983	1966
couleur			violet	bleu clair	blanc bleu	blanc

Tableau 2 : Etude expérimentale de la coloration de surface

Les calculs thermiques montrent qu'il s'établit, à la surface des cibles, un cycle thermique rapide (période d'environ 60 à 100  $\mu\text{s}$ ) avec des vitesses de refroidissement de l'ordre de  $10^9 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ , ce qui correspond à un effet de trempé.

Le modèle numérique permet de calculer, pour une durée d'impulsion donnée, la densité de flux nécessaire à la fusion ou la vaporisation en surface. Il semble que la couleur violette est juste à la limite de la fusion de surface (une couche de métal fondu très faible) et les couches bleues sont en dessous de la limite de vaporisation. Cependant on observe la présence d'une petite plume due à la vaporisation du substrat. Celle-ci peut s'expliquer par une localisation de l'énergie du faisceau. Au contraire les couches jaunes correspondent à un phénomène plus violent (les paramètres sont proches du domaine de la texturation).

L'étude de la variation d'état de surface lorsque le recouvrement augmente, montre que la densité de flux n'est pas le paramètre physique pertinent. Lorsque le taux de recouvrement (nombre d'impacts par unité de surface) augmente, la couleur évolue du violet au blanc. La notion de fluence semble être plus pertinent. La répétition des impacts permet de cumuler les cycles de chauffage et refroidissement favorisant les mécanismes d'oxydation. La modification de surface à chaque tir induit une augmentation des conditions d'absorption du faisceau (facteur d'absorption et surface plus rugueuse). Il se forme une plume de vapeur constituée de micro-particules qui s'oxydent au contact de l'air et se condensent sous forme d'agrégats.

#### 4. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons présenté un modèle thermique simple permettant d'estimer des ordres de grandeurs caractéristiques. Le but est de comprendre les mécanismes intervenant lors des procédés de texturation de surface et de coloration. Ces deux processus sont fortement complexes. Il est donc nécessaire d'évoluer vers des modèles plus élaborés. En particulier nous devons tenir compte de la dynamique des fluides.

Au niveau de la texturation, nous développons un modèle de l'interaction tenant compte du déplacement transversal de matière liquide, dans lequel sont couplés les équations du transfert de chaleur et les équations de la mécanique des fluides. L'action de la surpression due à la plume se fait sous la forme de la condition limite. La valeur de la pression est déterminée à l'aide du modèle de Semak.

Pour l'étude des mécanismes d'oxydation, il est important de comprendre la dynamique des phénomènes intervenant dans la plume: composition de la plume (atomes, ions, gouttes de liquide éjectée), gradient de température, de pression et de composition (en contact avec l'oxygène et azote du milieu ambiant), recombinaison des éléments avec formation d'agrégats et de couche d'oxydes. L'action de la plume n'est pas seulement une formation d'agrégats conduisant à un dépôt poudreux, mais dans le cas contraire d'agir comme une surpression ayant comme conséquence une insertion en profondeur des éléments chimiques (oxygène, azote, carbone).

#### Références

- [1] J. Meijer, Laser beam machining (LBM), State of the art and new opportunities, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.149, pp 2–17, 2004
- [2] A. Soveja, E. Cicală, G. Duffet, B. Martin, D. Grevey, Empirical modelling of laser texturing of 304L stainless steel, *Proc. ICALEO'2006*
- [3] L.Lavisse, C.Langlade, J.M.Jouvard et al., Oxidation of cp titanium assisted by an Nd:YAG pulsed laser: Importance of the laser-power density on the rate of oxygen absorbed by the substrate, *Lasers in Engineering*, vol. 13, n°2, pp.127-141, 2003
- [4] L.Lavisse, J.M.Jouvard, L.Imhoff, et al., Pulsed laser growth and characterization of thin films on titanium substrates, *E-MRS 2006 meeting, Nice, 2006*
- [5] J.M.Jouvard, A.Soveja, N.Pierron, Thermal modelling of metal surface texturing by pulsed laser, *Proc. Comsol Multiphysics Conference, Paris, 2006*
- [6] A.Soveja, J.M.Jouvard, B.Martin, D.Grevey, Texturation de surface métallique induit par faisceau laser Nd:YAG impulsif: Modélisation d'un impact, *Proc. SFT'2007*
- [7] A.Soveja, J.M.Jouvard, E.Cicală, G.Duffet, D.Grevey, B.Martin, Optimisation du processus de texturation des surfaces métalliques par faisceau laser, *Proc. 18<sup>e</sup> Congrès Français de Mécanique CFM'2007, Grenoble, 2007*
- [8] V.I. Semak, A. Matsunawa, The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 30, pp 2541-2552, 1997