

Texturation de surface métallique induite par faisceau laser Nd:YAG impulsif : Modélisation d'un impact laser

A. SOVEJA^{1,2}, J.M. JOUVARD^{1*}, B. MARTIN¹, D.GREVEY¹

¹ Université de Bourgogne, Institut Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 5209,
Département Interface et Réactivité des Matériaux, équipe Laser et Traitements des matériaux
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

* (auteur correspondant : jmj@iutlecreusot.u-bourgogne.fr)

Résumé - Le but de ce travail est de modéliser et optimiser le procédé laser de texturation d'une surface métallique. Lors d'un impact laser, il se forme une plume de matière ablatée. Cette plume exerce une surpression sur la couche de métal fondu qui est ainsi repoussée vers les bords de l'impact. Dans cette étude nous présentons une modélisation thermique de l'interaction lors d'un impact laser. L'utilisation de ce modèle permet de justifier les conclusions d'une analyse statistique des résultats expérimentaux.

1. Introduction

Le procédé de la texturation par laser [1-4] consiste en 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'impacts 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.

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 (300 μm) peut être considéré comme constant. La durée d'impulsion dépend des paramètres de fréquence et d'énergie. La puissance moyenne et la puissance crête peuvent se déduire des paramètres précédents.

L'objectif de notre travail est d'optimiser le procédé par rapport aux paramètres opératoires. 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 (τ_{las}) varie de 200 à 300 ns.

Dans une première étape, nous avons étudié l'optimisation du procédé laser de texturation dans le cadre d'un plan d'expérience [5,6]. Les deux propriétés à optimiser (fonctions objectives) sont la quantité de matière ablatée (le débit volumique D_v , exprimé en mm^3/min) et la rugosité (paramètre Sa exprimé en μm). Le but est de trouver un compromis entre un débit volumique maximum et une rugosité minimale (rapport D_v/Sa maximum). Nous avons montré que dans la gamme de fonctionnement, les fonctions objectives ne dépendent de façon significative que de la fréquence et de l'énergie. Nous avons ainsi pu définir des paramètres

opérateurs optimum [6]. Le but de notre étude est de comprendre d'un point de vue physique pourquoi ces paramètres sont optimum.

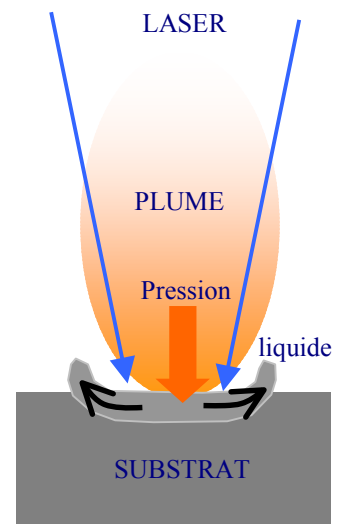
2. Modèle thermique

Afin de mieux comprendre les processus, nous développons une modélisation thermique de l'interaction laser-matière lors d'un impact laser. Nous présentons la première partie de cette étude, correspondant à un modèle unidimensionnel. 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: formation d'un cratère.

Notre but est de comprendre les phénomènes à l'origine de ce manque de matière. 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 sa place initiale ? La solidification a-t-elle lieu avant ce retour, formant ainsi un cratère ?



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:

- La profondeur affectée thermiquement (épaisseur de liquide de l'ordre du micron) est faible comparée au diamètre du faisceau (300 μm); 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 pour conséquences:

- 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).

- Si la quantité de matière vaporisée est grande, on a une perte de matière. Il faudrait donc enlever des points au maillage.

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 [7] 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 [7].

2.3.1. Source de chaleur

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 imposer une condition limite d'échange par convection et rayonnement avec un milieu de température T_{vap} . Cette condition peut s'interpréter physiquement comme l'échange d'énergie avec la plume.

Ainsi, en surface supérieure, on impose successivement la condition limite:

- flux constant en surface jusqu'à une température de surface $T = T_{vap}$
- température constante $T = T_{vap}$ en surface jusqu'à la fin de l'impulsion ($t < \tau_{las}$) imposée par un échange avec le milieu extérieur de température T_{vap} .
- refroidissement par convection et rayonnement avec l'air pour $t > \tau_{las}$

2.3.2. Energie transférée au plasma

Une partie de l'énergie du faisceau permet la vaporisation de la matière. Afin de déterminer cette quantité d'énergie, nous comparons le champ de température à la fin de l'impulsion laser au champ thermique initial. A l'aide de la relation de la calorimétrie, nous pouvons déterminer l'énergie acquise par chaque maille du système. Les points ayant une température supérieure à la température de fusion ont subi durant l'histoire thermique un changement de phase, il faut donc tenir compte de la chaleur latente de fusion. On peut ainsi calculer l'énergie acquise par chaque maille du système, puis l'énergie acquise par le système (énergie par unité de surface puisque nous sommes dans un modèle à 1 dimension). En comparant avec l'énergie théoriquement absorbée par le matériau, on obtient l'énergie transférée au plasma. En faisant le rapport avec la chaleur latente de vaporisation, on peut calculer la quantité de matière ablatée et la vitesse moyenne du front de vaporisation en divisant par le temps d'interaction.

Les résultats donnent un ordre de grandeur de l'énergie transférée au plasma et de la vitesse de déplacement du front de vaporisation similaire à celui du modèle analytique de Semak [8]

basé sur le bilan énergétique dans une zone d'interaction laser-métal. Dans ce modèle, Semak considère que dans la zone d'interaction une couche de liquide (d'épaisseur δ_m) est formée entre l'isotherme de vaporisation soumis à une pression de recul due à la vaporisation de matière (se déplaçant à une vitesse v_v) et l'isotherme de fusion (se déplaçant à une vitesse v_d). Le liquide s'évacue sur le bord avec une vitesse v_{liq} .

2.3.3. Résultats de cette étude

Les principales conclusions de la simulation numérique 1D sont les suivantes:

- Lorsque la densité de puissance augmente, les durées d'irradiation nécessaire pour atteindre la fusion en surface et la vaporisation diminuent.
- La profondeur maximale de liquide est de l'ordre de 1.6 μm . Elle varie peu pour la gamme de paramètres étudiés. Cependant, on peut noter une évolution de profondeur proportionnelle à la racine carrée de la durée de l'impulsion laser.
- La durée nécessaire à la solidification varie linéairement en fonction de la durée d'impulsion. Cette durée est de l'ordre d'une microseconde. En comparant à 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.

<i>Paramètres opératoires</i>	<i>numéro de l'essai</i>			1	2	3
	<i>puissance crête</i>	\tilde{P}	<i>kW</i>	10.9	14.5	28.4
	<i>durée d'impulsion</i>	τ_{laser}	<i>ns</i>	275	276	211
<i>Résultats expérimentaux</i>	<i>débit volumique</i>	D_v	<i>mm³.min⁻¹</i>	1.1	1.7	2.8
	<i>rugosité</i>	S_a	<i>μm</i>	33	15	158
		D_v / S_a	<i>mm².min⁻¹</i>	33	113	18
<i>Simulation numérique</i>	<i>temps de fusion</i>	t_f	<i>ns</i>	34	19	5
	<i>temps vaporisation</i>	t_v	<i>ns</i>	262	150	39
	<i>profondeur liquide</i>	e_{liq}	<i>μm</i>	1.51	1.74	1.66
	<i>profondeur ablatée</i>	e_{vap}	<i>nm</i>	11	90	392
	<i>pression recul</i>	P_{recul}	<i>10³ Pa</i>	7	19	166

Tableau 1 : Etude expérimentale de la texturation de surface

Dans le tableau 1 nous présentons quelques résultats de cette simulation numérique (la durée nécessaire pour atteindre la fusion t_f et la vaporisation t_v , la profondeur de la couche liquide e_{liq} et la profondeur ablatée e_{vap}), ainsi que des résultats obtenus en utilisant le modèle de Semak (la pression de recul P_{recul}) dans le but de comparer avec les résultats expérimentaux. La courbe 1 présente l'évolution de la température de surface au cours d'un impact laser.

- 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 explique l'irrégularité de la surface obtenue (mauvaise rugosité).

- L'essai 2 résultant de l'optimisation des paramètres opératoires [6] 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.

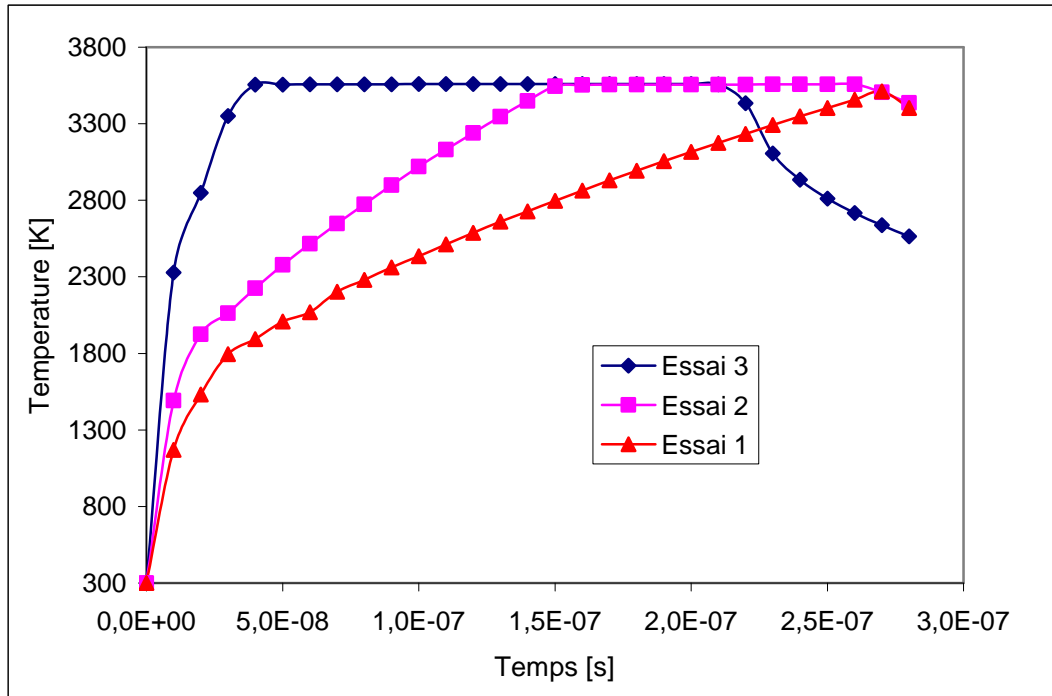


Figure 1 : Evolution de la température de surface au cours d'un impact laser

3. Prise en compte du déplacement de métal liquide

Le modèle thermique unidimensionnel permet de valider l'hypothèse d'une couche de liquide très petite comparée à la largeur de l'impact laser et donc d'un fort gradient de température longitudinal. Cependant il ne permet pas de tenir compte du déplacement transverse de liquide, induisant une légère déformation de surface et la formation d'un bourrelet. La seconde partie de notre étude a comme objectif de prendre en compte les mouvements du métal fondu repoussé sur les bords de la zone d'interaction.

Nous développons un modèle de l'interaction tenant compte du déplacement transversal de matière liquide. La source de chaleur étant à symétrie axiale, nous pouvons travailler en géométrie 2D axisymétrique. Nous couplons les équations du transfert de chaleur instationnaire et les équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes). L'action de la surpression due à la plume se fait sous la forme de la condition limite (Ecoulement sortant/Pression). La valeur de la pression est déterminée à l'aide du modèle de Semak.

La principale difficulté de ce modèle numérique est liée au maillage. Le fort gradient de température dans la direction longitudinale nécessite un maillage très fin. Le diamètre important du faisceau laser entraîne un gradient de température et de vitesse faible dans la direction transverse. Il faut donc travailler avec des mailles allongées, afin d'obtenir un temps de calcul raisonnable.

De plus, le métal repoussé sur les bords de la zone irradiée forme un bourrelet. Afin de tenir compte de la déformation de la surface, nous développons actuellement un modèle utilisant la méthode ALE (logiciel Comsol-Multiphysics[®]). Dans ce modèle, il est nécessaire de prendre en compte la tension de surface, qui s'oppose au déplacement du liquide. Après la fin de l'irradiation laser, cette force de tension de surface sera le moteur du retour du liquide vers sa position d'origine. Le but final est d'étudier le déplacement du liquide sur un cycle chauffage-refroidissement, afin d'estimer si le métal liquide rejeté sur le bord de l'impact réussit à revenir à sa place initiale ou si la solidification a lieu avant le remplissage du cratère.

Les premiers résultats de ce modèle montrent une déformation de la surface irradiée de 20 nm et la formation d'un bourrelet dont la hauteur est de quelques nanomètres. L'épaisseur de la couche de liquide est quasiment égale au résultat obtenu en utilisant le modèle thermique unidimensionnel. Ceci justifie de nouveau l'utilisation de ce précédent modèle.

4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons présenté une modélisation thermique unidimensionnelle de l'interaction lors d'un impact laser. Nous avons en particulier tenu compte de la vaporisation et de la présence de la plume de vapeur sous la forme d'une condition limite de température en surface. Nous avons pu déterminer l'ordre de grandeur de la couche de métal fondu, ainsi que les temps caractéristiques de fusion, vaporisation et solidification. L'utilisation de ce modèle permet de justifier les conclusions de l'analyse statistique des résultats expérimentaux. En effet, les paramètres optimaux semblent correspondre à un compromis. Il y a une fusion rapide de la surface du matériau et formation d'une petite couche de métal fondu. La quantité de matière vaporisée est faible. L'action de la pression de recul induit un léger déplacement de ce liquide, ce qui peut expliquer après accumulation des impacts un état de surface suffisamment régulier. Cependant, nous travaillons actuellement à l'élaboration d'un modèle 2D afin d'étudier le déplacement du liquide sur un cycle chauffage-refroidissement et d'estimer la modification de la surface résultant d'un impact laser.

Références

- [1] Johan Meijer, Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities, *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 2–17;
- [2] G. Lallemand, G. Jacrot, E. Cicala, D. F. Grevey, Grooving by Nd:YAG laser treatment, *Journal of Materials Processing Technology* 99 (2000) 32-37
- [3] J. Qi, K. L. Wang, Y. M. Zhu, A study on the laser marking process of stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 139 (2003) 273-276;
- [4] A. Kaldos, H. J. Pieper, E. Wolf, M. Krause, Laser machining in die making - a modern rapid tooling process, *Journal of Materials Processing Technology* 155-156 (2004) 1815-1820;
- [5] A. Soveja, E. Cicală, G. Duffet, B. Martin, D. Grevey, Empirical modelling of laser texturing of 304L stainless steel, *Proc. ICALEO'2006*
- [6] 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^e Congrès Français de Mécanique CFM'2007*, Grenoble
- [7] J.M.Jouvard, A.Soveja, N.Pierron, Thermal modelling of metal surface texturing by pulsed laser, *Proc. Comsol Multiphysics Conference 2006*, Paris
- [8] Vl. Semak, A. Matsunawa, The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30 (1997) 2541-2552