

Action laser pulsé

Introduction

Le pyromètre multichromatique est appliqué pour la mesure de la température de luminance pendant l'action pulsée du laser Nd:YAG (HAAS-HL62P) sur la surface de l'acier inoxydable (INOX 304L). Les « notch » filtres spécialement développés (transmission 10^{-6} à la longueur d'onde de $1,06 \mu\text{m}$) sont appliqués pour éviter l'influence du rayonnement de laser sur les mesures de température. La restauration de la température vraie est basée sur la méthode multicolore. L'exactitude des mesures de la température de luminance est examinée par comparaison d'évolution de la température pour les impulsions avec la durée différente mais avec la même valeur du flux de densité d'énergie.

L'influence des paramètres suivants est étudiée :

- durée d'impulsion (6-20 ms., forme d'impulsion rectangulaire),
- énergie par impulsion (10-33 J, forme d'impulsion rectangulaire),
- forme d'impulsion (3 types de triangulaire et de rectangulaire ; trois types de superposition de différents rectangles).

Enfin, l'évolution de la température de surface pour les impulsions avec une forme plus complexe mais avec la même durée et énergie d'impulsion est comparée.

Utilisation de la méthode non contact de mesures de la température par un pyromètre dans les procédés laser donne les avantages dans le cas d'une analyse détaillée d'évolution de la température de surface en fonction des paramètres d'opérateurs de laser et des propriétés de matériaux. Cependant l'application de la pyrométrie dans les procédés laser exige la solution d'un certain nombre de difficultés méthodologiques. Les deux problèmes de base sont :

(a) mesures correctes de la température de luminance (c'est à dire éviter la superposition du rayonnement thermique mesuré avec différents types de "bruit")

(b) détermination correcte de la température vraie.

La majorité des pyromètres commerciaux qui opèrent dans la bande spectrale infrarouge proche ne peut pas être appliquée dans le procédé Nd-YAG laser en raison de la faible protection contre le rayonnement laser réfléchi (parasite) ($\lambda = \mu\text{m } 1,06$). L'innovation de l'approche actuelle est l'application des « notch » filtres spécialement développés ainsi que d'un pyromètre multichromatique. En conséquence, la dynamique de fusion et de solidification, c.-à-d. l'instant initial de fusion, le temps de la vie du bain de fusion et la phase de solidification peuvent être analysés en utilisant des données fiables sur la température vraie.

L'action laser avec les impulsions de la durée de milliseconde est applicable dans le soudage laser de plaques fines (par exemple, les boîtes kovar hermétiques pour la microélectronique), le rechargement laser (moules réparant), la refusion des couches supérieures de revêtement déposé par projection thermique et d'autres applications laser liées à la fusion d'une couche fin, pour éviter de créer une large zone thermiquement affectée (HAZ).

Résultats

Variation de l'énergie apportée

La variation du cycle thermique a été étudiée pour l'énergie par impulsion dans l'intervalle entre 13 et 30 J, la durée d'impulsion fixe (10 ms), la forme d'impulsion rectangulaire. Les résultats sont portés sur la figure 3a pour la température de luminance (longueur d'onde du pyromètre $\lambda = 1,376 \mu\text{m}$) et sur la figure 3b pour la température vraie. Notez qu'en raison de la limite de sensibilité de pyromètre (900°C), seulement les températures supérieures à 900°C des cycles thermiques sont présentées.

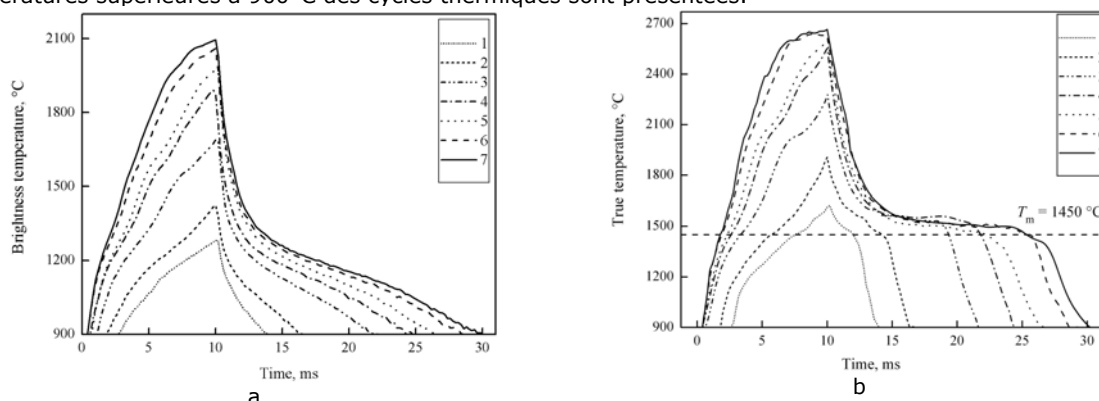


Figure 3. Action laser pulsé (Nd : YAG) sur un échantillon de l'acier inoxydable : différentes énergies par impulsion pour une durée d'impulsion fixée (10ms). La forme d'impulsion est rectangulaire. La courbe 1 correspond à 13 J par impulsion; courbe 2 - 15 J; courbe 3 - 20 J; courbe 4 - 23 J; courbe 5 - 25 J; courbe 6 - 28 J; courbe 7 - 30 J; (a) - la température de luminance (longueur d'onde du pyromètre $\lambda = 1,376 \mu\text{m}$); (b) - la température vraie reconstituée.

Variation de forme d'impulsion

L'idée d'optimisation de la forme d'impulsion dans l'action laser pulsé-périodique (traitement par laser pulsé-périodique) est discutée depuis longtemps. Dans la présente étude, nous avons utilisé les différentes formes d'impulsion avec la durée d'impulsion fixée à 18 ms et l'énergie par impulsion fixée à 30 J. L'évolution de température pour les deux différents impulsions triangulaires est présentée sur la figure 4 : (1) la forme d'impulsion laser; (2) la température de luminance mesurée à la longueur d'onde du pyromètre $\lambda = 1,376 \mu\text{m}$; (3) la température vraie reconstituée.

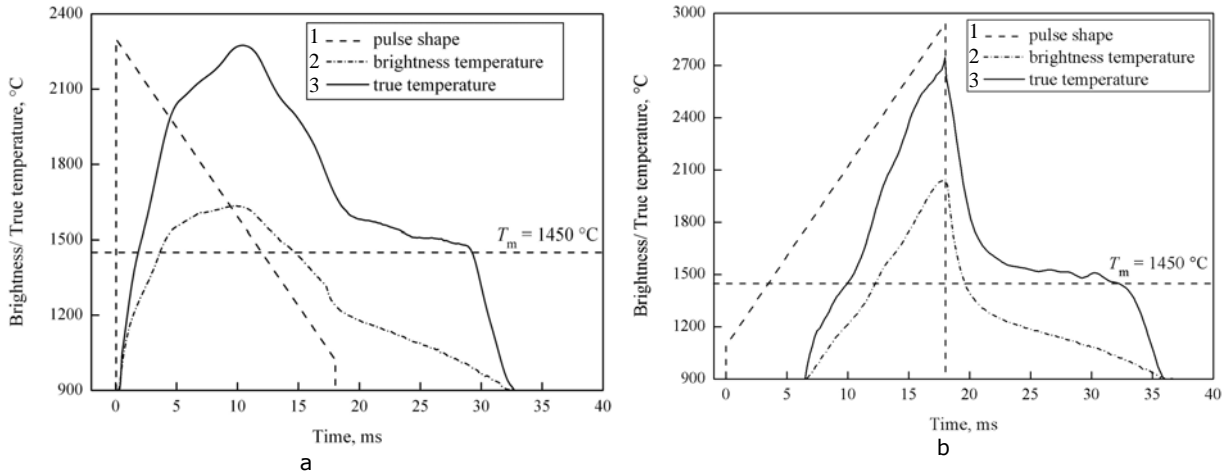


Figure 4. Action laser pulsé (Nd : YAG) sur un échantillon d'acier inoxydable : évolution de température de surface pour les deux formes d'impulsions triangulaires laser : (a) – triangle gauche, (b) – triangle droit; la durée d'impulsion est 18 ms, l'énergie par impulsion est 30 J. 1 - la forme d'impulsion laser, 2 - la température de luminance ($\lambda = 1,376 \mu\text{m}$); 3 - la température vraie.

La zone de la température maximale peut être soit pointue soit arrondie selon la forme d'impulsion laser. L'instant d'amorçage de la fusion, t_m , du triangle gauche (décroissance de densité de flux d'énergie) est supérieur à celui-ci du triangle droit (augmentation de densité de flux d'énergie). On peut noter que les valeurs extrêmes discutées ci-dessus T_{maxB} , T_{lt} , etc. correspondent au triangle droit, i.e. l'augmentation de densité de flux d'énergie dans l'impulsion mène aux valeurs de T_{max} , t_m plus grandes et à une valeur de T_{lt} plus petite.

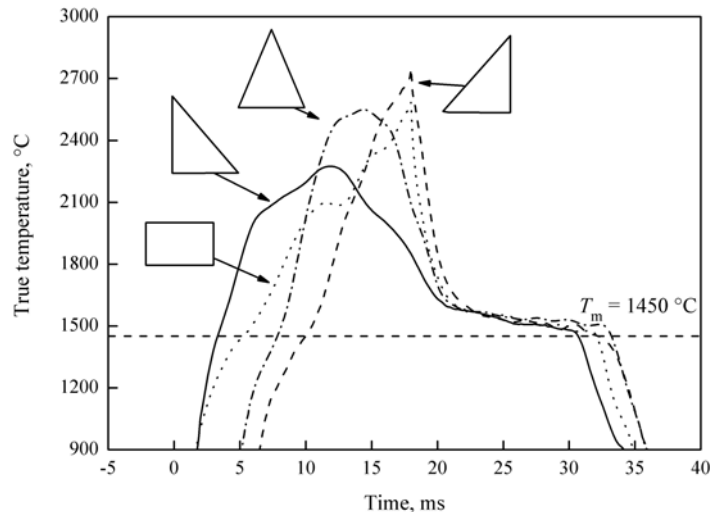


Figure 5. Action laser pulsé (Nd : YAG) sur un échantillon d'acier inoxydable : évolution de température de surface pour les différentes formes d'impulsion laser : rectangulaire et triangles (gauche/droit) ; la durée d'impulsion 18 ms, l'énergie par impulsion 30 J.

Simulation numérique

Les résultats expérimentaux sont comparés à ceux obtenus par simulation numérique en utilisant un modèle de transfert thermique 1D en tenant compte la transformation des phases de fusion/solidification et d'évaporation.

D'une part, il est connu que $A \sim 0,4$ est une valeur d'absorptivité typique pour les métaux à une longueur d'onde d'environ $1 \mu\text{m}$. D'une autre part, on a choisi $A = 0,38$ pour égaliser le moment de solidification de la masse fondue, dans la théorie et dans l'expérience.

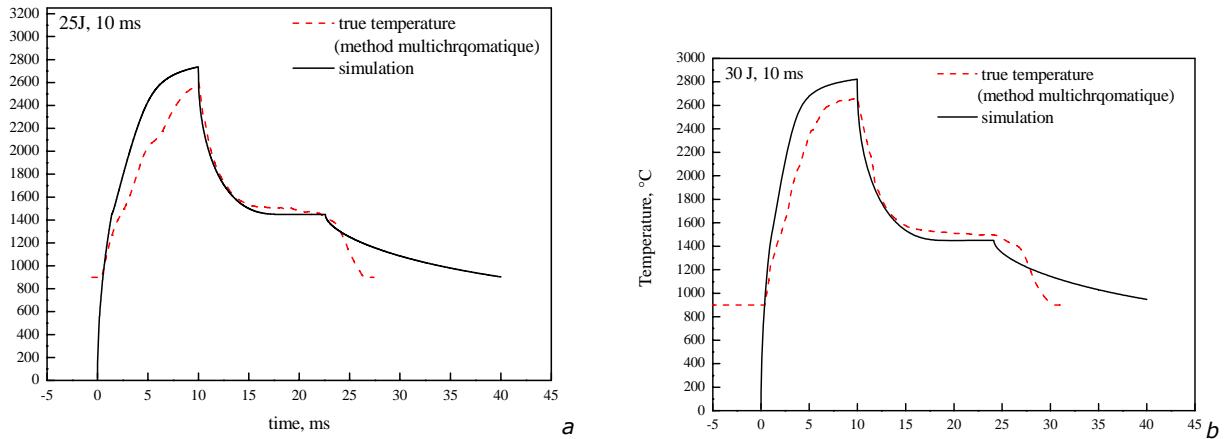


Figure 6. Action laser pulsé (Nd :YAG) sur un échantillon d'acier inoxydable : comparaison des résultats de la simulation numérique avec la température reconstituée par la méthode multichromatique. a - durée d'impulsion 10 ms ; énergie apportée par impulsion 30 J, forme d'impulsion rectangulaire ; b - durée d'impulsion 10 ms ; énergie apportée dans impulsion 25 J, forme d'impulsion rectangulaire.

La détermination de température vraie permet d'analyser plus détailler la dynamique de fusion/solidification, en particulier déterminer les paramètres comme : la durée de la phase de solidification τ_s , le temps de vie de la phase fondue τ_{lf} , l'instant initial de fusion τ_m (Figure 7a). La comparaison des résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux pour la transmission des phases est reportée sur la Figure 7b.

Les résultats de la simulation numérique (figure 8) sont en accord qualitatif avec les résultats de mesures pyrométriques présentés sur la figure 5. Le maximum de la température correspond au triangle droit (intensité croissante en fonction du temps), la température crête atteint son minimum dans le cas du triangle gauche (intensité décroissante en fonction du temps). Les valeurs intermédiaires, pour la théorie et pour l'expérience, relèvent aux triangles équilatéraux.

D'autre part, on peut noter certaines distinctions qualitatives. Dans le cas d'impulsions triangulaires (Figure 5 et Figure 8) le calcul de température donne des valeurs excessives par rapport à l'expérience (les valeurs maximales de température ainsi que les valeurs transitoires).

Par exemple, pour l'impulsion gauche (intensité décroissante en fonction du temps) la différence entre les températures maximales est de 320 °C : calculée - 2594°C, expérimentale - 2274°C. Ces valeurs maximales de température sont atteintes à $t=6,78$ ms (pour le calcul) et à $t=11,73$ (pour l'expérience).

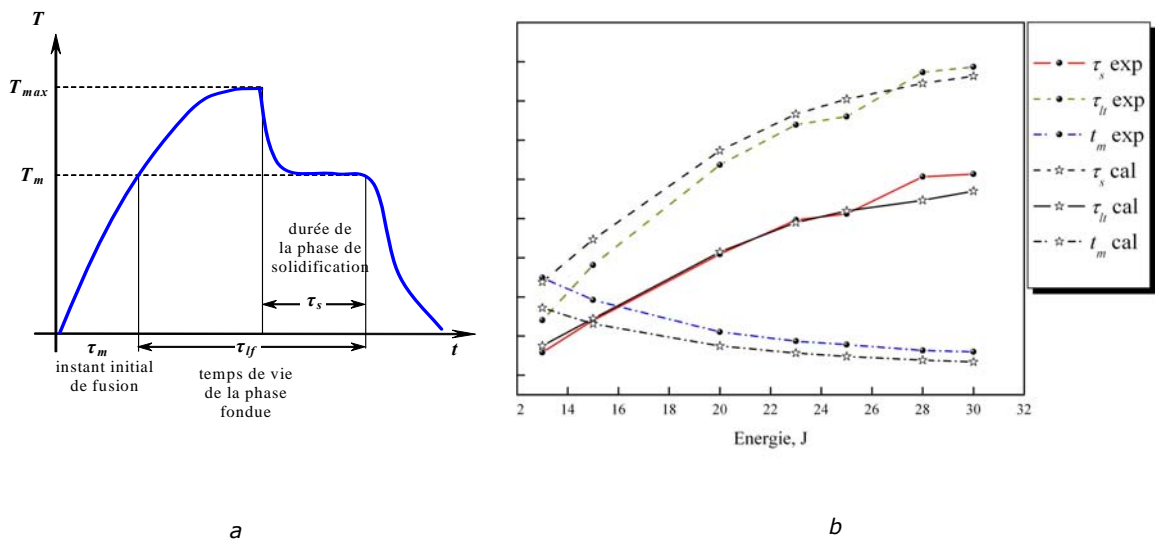


Figure 7. Comparaison des résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux (la durée de la phase de solidification τ_s , le temps de vie de la phase fondue τ_{lf} , l'instant initial de fusion τ_m) (a)) pour la transmission des phases (b).

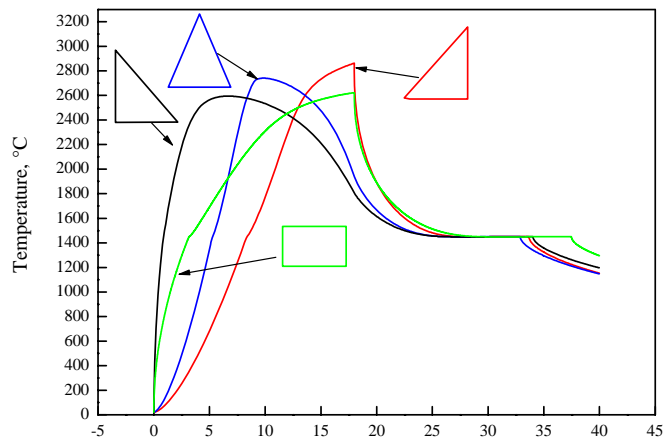


Figure 8. Action laser pulsé (Nd :YAG) sur un échantillon d'acier inoxydable : simulation numérique. Différentes formes d'impulsion laser : rectangulaire et différents triangles ; avec la même durée d'impulsion 18ms et l'énergie par impulsion 30 J.

Conclusions

✓ En modifiant la forme d'impulsion laser avec la même durée d'impulsion et la même énergie apportée par impulsion, il est possible d'obtenir les différentes évolutions de température de surface. Cela permet de changer la durée de vie de la phase fondue et l'instant d'amorçage de fusion. Pour réduire au minimum la variation de température de surface, pour éviter la décomposition thermique de certains composants dans la zone de fusion, pour augmenter la durée de vie de la phase fondue, il est nécessaire d'appliquer une densité de flux d'énergie plus élevée au début d'impulsion laser.

✓ Pour obtenir une crête de température de surface plus élevée, avec une énergie apportée et une durée d'impulsion données, il est nécessaire d'appliquer une densité de flux d'énergie plus élevée à la fin d'impulsion, ceci réduira au minimum la durée de vie de la phase fondue. En général, il est possible de programmer l'instant initial du refroidissement de la phase fondue et réaliser un refroidissement intensif de la phase fondue pendant l'action.