

Modèle thermique instationnaire d'un traitement superficiel par une source Laser mobile

Jamel Bessrour*, Mahmoud Bouhafs, Ridha Khadrani, Mohamed Jemmali

Laboratoire de génie mécanique, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37 Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie

Reçu le 1^{er} décembre 2000; accepté le 13 novembre 2001

Résumé

Les méthodes de simulation numériques permettent de contrôler l'influence de tous les paramètres du traitement thermique superficiel par Laser et constituent des outils prédictifs d'optimisation des conditions du traitement. L'étude proposée est une contribution à l'établissement d'un modèle instationnaire qui permet de simuler l'histoire thermique totale du traitement superficiel dans un domaine tridimensionnel, de frontière quelconque, jusqu'au retour à l'équilibre thermique au refroidissement. La formulation du problème intègre un code de calcul par éléments finis pour la résolution de l'équation de la chaleur en régime transitoire non linéaire. Le schéma numérique développé permet la résolution avec une condition de frontière mobile moyennant une discrétisation spatio-temporelle adaptée. Il tient compte des non-linéarités dues à la variation des caractéristiques thermophysiques en fonction de la température et des pertes par rayonnement et celles par convection. La chaleur de changement de phase solide est introduite comme une source dans la zone affectée thermiquement. Comparé à d'autres travaux, basés sur des formulations analytiques, ce modèle apporterait une approche plus fine qui permet de s'affranchir de plusieurs hypothèses simplificatrices adoptées jusqu'à présent. Une étude expérimentale basée sur l'identification microstructurale de l'éprouvette traitée et des mesures de dureté confirme la précision des résultats du modèle numérique.

© 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Abstract

Numerical simulation methods permit the control of most parameters in surface heat treatment by Laser and constitute tools for treatment conditions prediction and optimisation. This paper deals with a transient numerical model which enables the simulation of all thermal history for three-dimensional space with any boundary conditions till the return to the thermal equilibrium at cooling. The problem formulation integrates a standard FEM code to solve the heat equation in non-linear transient behaviour. The numerical scheme proposed authorises the resolution with moving boundary condition in consideration of suitable space and time meshing. This model takes into account the non-linearities in relation with the variation of thermophysics properties with temperature and the loss by radiation and convection. The heat of solid phase changing is introduced as conditional source into the thermal affected zone. Compared with several contributions in this subject, this model should give a more subtle approach which gets free from classical simplifying assumptions.

© 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Traitement superficiel ; Source laser ; Simulation numérique ; Instationnaire ; Modèle non linéaire ; Conditions aux limites mobiles

Keywords : Surface treatment; Laser source; Numerical simulation; Transient; Non-linear model; Moving boundary conditions

1. Introduction

Le durcissement superficiel des aciers par transformation structurale en phase solide au Laser CO₂, consiste à chauffer localement la pièce traitée par absorption de l'énergie radiative du faisceau. Au passage du spot Laser, mobile par rapport à la surface traitée, un chauffage intense puis un re-

froidissement rapide sont atteints. La faible dimension de la zone affectée thermiquement devant celles caractéristiques de la pièce, détermine des vitesses de refroidissement élevées et entraîne la formation de structures hors équilibre (Fig. 1).

Le refroidissement rapide par conduction de la chaleur vers l'ensemble du domaine, conduit à une auto trempe qui entraîne la formation de la martensite et confère à l'échantillon traité des propriétés physico-mécaniques parfaitement définies.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : jamel.bessrour@enit.rnu.tn (J. Bessrour).

Nomenclature

a	largeur du spot	m
A	coefficient d'absorption de la surface traitée	
A_1	température de la transformation eutectoïde	
	$\alpha + P \rightleftharpoons \alpha + \gamma$	K
A_3	température de la transformation allotropique	
	de l'acier $\gamma + \alpha \rightleftharpoons \gamma$	K
b	longueur du spot	m
c	chaleur massique	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
h	coefficient d'échange	
	par convection	W·m ⁻² ·K ⁻¹
H	enthalpie massique	J·kg ⁻¹
HV	dureté Vickers	
I	indice de la position du spot	
J	indice de la position du spot	
n	normale à la surface extérieure du domaine	
NP	nombre total de positions du spot	
P	densité de puissance	
	du faisceau laser	W·m ⁻²
P_0	plan transversal moyen	
q_0	chaleur de changement de phase	J·m ⁻³
\dot{q}_0	source volumique	W·m ⁻³
R_e	rayon extérieur du disque	m
t	temps	s
T	température	K
T_0	température ambiante	K

V	vitesse relative du spot	m·s ⁻¹
$ZAT(I)$	zone affectée thermiquement à la position I	
	du spot	m ³

Symboles grecques

α	ferrite	
δl	pas spatial	m
δt	pas de temps pendant le traitement	s
δt_r	pas de temps au refroidissement	s
ε	émissivité de la surface extérieure	
γ	austénite	
$\Gamma_e(I)$	surface élémentaire éclairée par le spot	
	dans la position I	m ²
Γ_e	surface totale éclairée	m ²
Γ_{ex}	surface extérieure totale du domaine	m ²
φ_l	flux laser	W·m ⁻²
φ_c	flux des pertes par convection	W·m ⁻²
φ_r	flux des pertes par rayonnement	W·m ⁻²
φ_0	flux nul	
λ	conductivité thermique	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
ρ	masse volumique	kg·m ⁻³
σ	constante de Stéphan	W·m ⁻² ·K ⁻⁴
τ	durée d'interférence laser-matière	s
Ω	domaine d'étude	

L'efficacité du traitement passe, en premier lieu, par la capacité à maîtriser les évolutions spatio-temporelles des champs de températures induits dans le matériau. Ces évolutions, qui conditionnent la cinétique de chauffe ainsi que la profondeur et la largeur de la zone traitée, dépendent des paramètres suivants :

- la puissance du Laser et la taille du faisceau ;
- l'interaction du faisceau avec le matériau : l'absorption par la surface et la durée d'interaction ;
- les transferts thermiques : les propriétés thermo-physiques du matériau (conductivité thermique, capacité thermique, chaleurs latentes de changement de phase) et les pertes en surface par rayonnement et par convection.

La multiplicité des paramètres ainsi que leur sensibilité aux variations de température en cours de processus, conduit fatalement à une expérimentation longue et coûteuse. Une optimisation des variables de processus serait fortement simplifiée par la mise en place d'un outil de simulation numérique fiable qui, de plus, offrirait des possibilités de prédiction des grandeurs finales recherchées.

La modélisation du traitement thermique s'appuie sur la résolution de l'équation de la chaleur dans les conditions du traitement Laser. La principale difficulté réside dans la non-monotonie de la condition aux limites en chargement,

non linéaire, portant sur la face éclairée par la source Laser. Les variations importantes des paramètres, bien que très localisées autour de la zone d'impact du faisceau, sont directement influencées par les conditions aux limites imposées sur l'ensemble du domaine.

Devant les aspects complexes de la modélisation de ce problème, plusieurs auteurs ont émis des hypothèses simplificatrices et se sont contentés d'une description probable des effets induits [1]. Pour des résultats approchés, moyennant certaines hypothèses, des solutions analytiques ont été adoptées pour décrire le régime quasi-stationnaire qui s'établit après un temps relativement court autour de la zone d'interaction Laser-matériau [2]. En fait, la plupart des auteurs ont adopté des méthodes analytiques qui permettent, grâce à leur simplicité de programmation, de cerner les ordres de grandeur et les tendances principales des solutions [3–5]. Ces méthodes supposent que le domaine est un espace semi-infini et que le problème admet un régime établi asymptotique solution d'un modèle stationnaire dans un repère lié au faisceau [3]. Dans l'équation de la chaleur, le terme $\rho c(\partial T/\partial t)$ est remplacé par le terme de convection $\rho c V \text{grad}(T)$. On néglige souvent les pertes par rayonnement et la chaleur de changement de phase est toujours omise. Geissler et Dubuigne [4–6] ont largement développé ces modèles analytiques.

Nous constatons, par ailleurs, que les travaux concernant le traitement superficiel par Laser, publiés dans les années 90, adoptent la même modélisation thermique [7–15].

Les hypothèses simplificatrices adoptées, qui permettent d'éliminer la non linéarité du problème, ont rendu possible l'utilisation de codes de calcul numériques (différences finies ou éléments finis) qui relèvent des transferts de chaleur en milieu fluide en égard au terme $\rho c V \text{ grad}(T)$. Toutefois, les ressources des codes numériques disponibles n'ont pas pu être exploitées pour résoudre le problème instationnaire avec une condition aux limites mobile [16]. En effet, l'utilisation de ces codes a souvent été qualifiée de lourde et onéreuse, ce qui a poussé vers le développement des formulations stationnaires et l'adoption de solutions analytiques simplifiées des champs de température.

Plus récemment, le code de calcul des structures par éléments finis CASTEM 2000 du CEA, a proposé une procédure (ARCGAU) qui calcule le champ des températures résultant du déplacement d'un arc de soudure, de répartition énergétique gaussienne, sur une plaque infinie selon un axe X . Cette procédure est basée sur la solution analytique du problème stationnaire tirée du Rosenthal [17].

Le code de simulation de soudage et traitement thermique SYSWELD du groupe ESI, propose dans sa version 99 une réduction du temps de calcul en adoptant la formulation du régime stationnaire dans le cas d'un soudage continu à l'aide d'une source mobile. Le maillage est alors affiné localement autour d'une position courante du cordon. La version 2000 reprend le calcul de l'état stationnaire de soudage [18] avec une prédiction de l'état de contraintes et déformations résiduelles.

Nous proposons, dans cette étude, un modèle purement instationnaire qui permet de simuler avec une bonne précision l'histoire thermique totale dans tout le domaine d'étude depuis le début du traitement jusqu'au retour à l'équilibre thermique au refroidissement.

Il faut noter que le cas spécifique envisagé pour cette étude, relatif au traitement de la face latérale d'un disque mince avec un mouvement circulaire du spot, ne peut pas être traité directement par les méthodes analytiques citées précédemment.

Cette étude est motivée par l'évolution considérable de la puissance des moyens de calcul qui permet de développer des procédures personnalisées, relativement complexes, avec un temps de calcul raisonnable. Nous avons établi une formulation du problème et développé un schéma numérique qui intègre un code standard de calcul par éléments finis permettant de résoudre l'équation de la chaleur en régime transitoire non linéaire. Ce schéma numérique permet la résolution avec une condition de frontière mobile sans aucune hypothèse sur la géométrie du domaine, moyennant une discrétisation spatio-temporelle adaptée. Il permet également de tenir compte de la non linéarité introduite par l'expression du flux perdu par rayonnement et éventuellement de la chaleur de changement de phase de l'acier comme une source volumique conditionnelle dans la zone affectée ther-

miquement. Les caractéristiques thermophysiques du matériau sont considérées comme fonctions de la température.

Cette modélisation permet de simuler le traitement superficiel par Laser sans recours aux hypothèses simplificatrices jusqu'alors adoptées par la plupart des auteurs. Elle offre ainsi un caractère quasi général pour la simulation numérique des traitements superficiels par Laser.

2. Modèle numérique de transferts thermiques en régime transitoire avec une condition de frontière mobile

2.1. Modèle géométrique. Maillage

La pièce traitée est un disque entraîné en rotation uniforme autour de son axe. Le faisceau laser fixe est appliqué sur la surface latérale (Fig. 1) et est centré sur le plan transversal moyen P_0 qui sera considéré par la suite comme plan de symétrie. Le traitement est appliqué durant un tour du disque.

Le modèle géométrique de la pièce, retenu pour la simulation, est constitué d'un maillage tridimensionnel non uniforme (Fig. 2). L'affinement suivant la profondeur permet une description plus fine des champs de température au voisinage de la face éclairée lieu des plus forts gradients. En considérant la symétrie par rapport à P_0 , le domaine d'étude est réduit à la moitié du disque en ajoutant une condition aux limites de paroi adiabatique. Le domaine est discretisé en 3510 éléments pour 4320 nœuds.

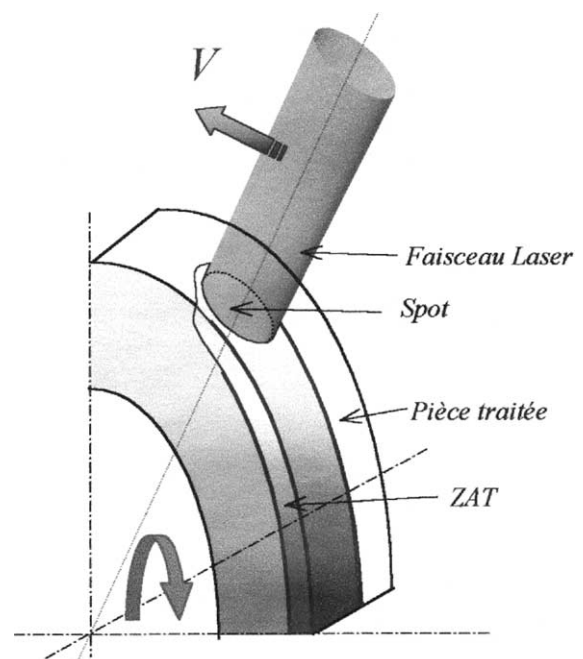


Fig. 1. Schéma de principe d'un traitement superficiel par Laser.

Fig. 1. Principle scheme of Laser surface treatment.

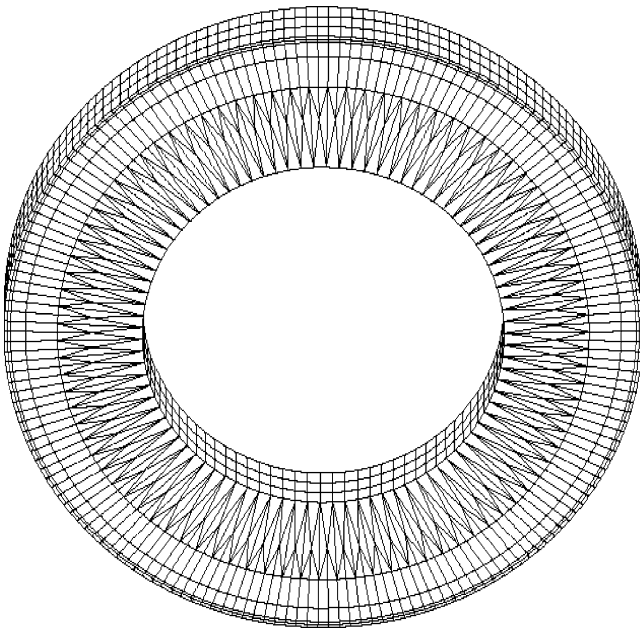


Fig. 2. Modèle géométrique—Maillage.

Fig. 2. Geometric model—Meshing.

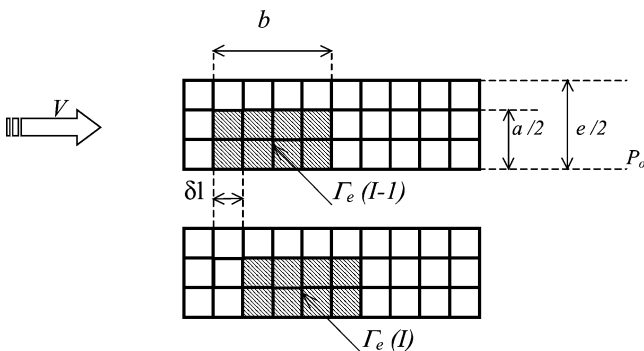


Fig. 3. Maillage de la surface éclairée par le spot.

Fig. 3. Meshing of lighted surface by spot.

Afin de pouvoir tenir compte dans le schéma numérique de la condition de frontière mobile correspondant au mouvement relatif du spot par rapport au disque, nous avons adopté pour la surface latérale, un maillage en relation avec les dimensions du spot. Nous avons considéré, suivant l'angle de rotation, un nombre NP de secteurs à maillage répétitif ayant la dimension b du spot suivant le sens du défilement. Suivant l'axe, la dimension des mailles est prise égale à la demi largeur $a/2$ du spot. On note la surface élémentaire, indice I , éclairée par le spot $\Gamma_e(I)$, où I désigne la position du spot et varie de 1 à NP . La Fig. 3 montre la discrétisation de $\Gamma_e(I)$ en 8 éléments de type quadrangle et deux positions successives du spot avec un pas spatial δl .

2.2. Caractéristiques thermophysiques du matériau

Les gradients de température à l'intérieur de la pièce traitée étant élevés, le modèle adopté doit nécessairement tenir compte de la variation des caractéristiques thermophysiques du matériau en fonction de cette grandeur. La Fig. 4 présente les évolutions de λ , ρ et c en fonction de la température pour le matériau utilisé (acier au NiCrMo désigné selon EN par 36 NiCrMo 16) [3], les brusques variations de ces caractéristiques correspondent au changement d'état structural de cet acier.

2.3. Formulation du problème thermique

La détermination des évolutions spatio-temporelles des températures dans la pièce traitée est basée sur la résolution de l'équation de la chaleur, en régime transitoire, dans un repère fixe, respectant des conditions initiales et aux limites bien définies, avec les hypothèses suivantes :

- l'énergie du spot Laser est absorbée en surface ;
- le spot a une forme rectangulaire de dimension $(a \times b)$ et la répartition de puissance est uniforme ;
- le faisceau se déplace par rapport à la pièce à une vitesse constante V ;

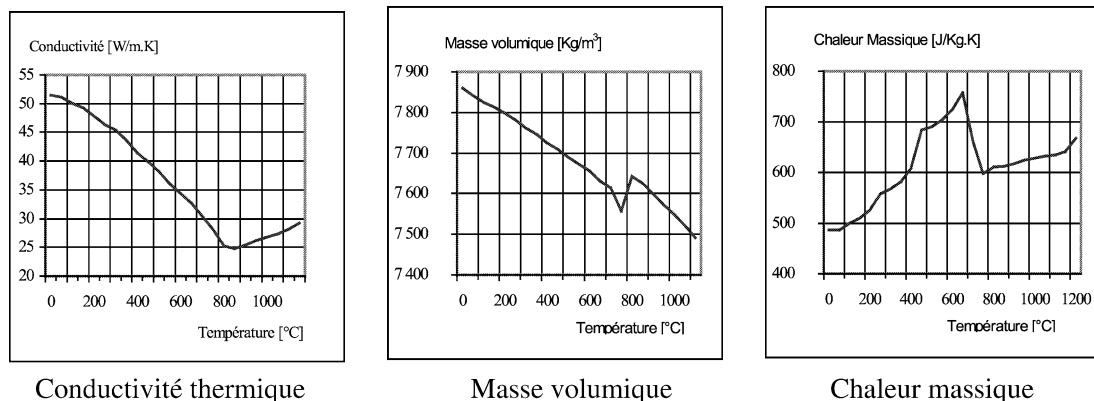


Fig. 4. Caractéristiques thermophysiques du matériau.

Fig. 4. Material thermophysic characteristics.

- le coefficient d'absorption de la pièce est supposé constant ;
- la température de surface n'atteint jamais la température de fusion du matériau.

On peut noter que l'influence de la forme du spot, de la répartition spatiale de la puissance et du coefficient d'absorption a été largement discutée dans plusieurs publications [19–34].

Pour la formulation mathématique du modèle thermique instationnaire, on applique sur $\Gamma_e(I)$ les flux laser $\varphi_l = AP$, de rayonnement $\varphi_r = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$ et de convection $\varphi_c = h(T - T_0)$. Sur la surface totale traitée $\Gamma_e = \sum \Gamma_e(I)$, on superpose φ_r et φ_c . Le flux des pertes par convection φ_c sera appliqué sur la surface extérieure totale du domaine Γ_{ex} , excepté le plan adiabatique P_0 .

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho H(T)}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T) \overrightarrow{\text{grad}} T] + \dot{q}_0 & \text{dans } \Omega \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) = AP & \text{sur } \Gamma_e(I) \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) = 0 & \text{sur } \Gamma_e \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 & \text{sur } \Gamma_{ex} \\ T = T_0 & \text{à } t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Pour résoudre le système non linéaire (1) obtenu, nous adoptons la méthode des éléments finis.

2.4. Discrétisation temporelle

On considère la durée d'interférence Laser-matière $\tau = b/V$ pendant laquelle un point « voit » passer le spot. Pour chaque position I du spot, on résout le système (1) en adoptant une discrétisation du temps qui exprime le bilan thermique global pour chaque intervalle $[t, t + \delta t]$. Le pas de temps est $\delta t = \delta l/V$ ou $\delta t = \tau(\delta l/b)$. Ceci revient à substituer le système (1) par NP sous systèmes exprimés aux différents pas. On tient compte du déplacement de la tache Laser en faisant une reprise de la résolution du système (1) avec le spot dans la position $(I + 1)$ correspondant à une application du flux Laser sur $\Gamma_e(I + 1)$ avec, comme nouvelle condition initiale, le champ de température résultat du calcul précédent dans la position I . La durée d'un cycle de traitement, correspondant à un tour complet du disque, est $(NP \times \delta t)$.

Pour la phase de refroidissement qui suit le traitement, on annule le flux Laser et on considère comme condition initiale le champ de température résultat du pas NP jusqu'au retour à l'équilibre thermique. On adopte pendant cette phase un pas de temps δt_r plus grand afin de limiter le temps de calcul.

2.5. Schéma numérique de résolution

On peut considérer que la résolution comporte trois blocs de calcul. Le premier correspond au démarrage du traitement avec le spot dans la position initiale ($I = 1$).

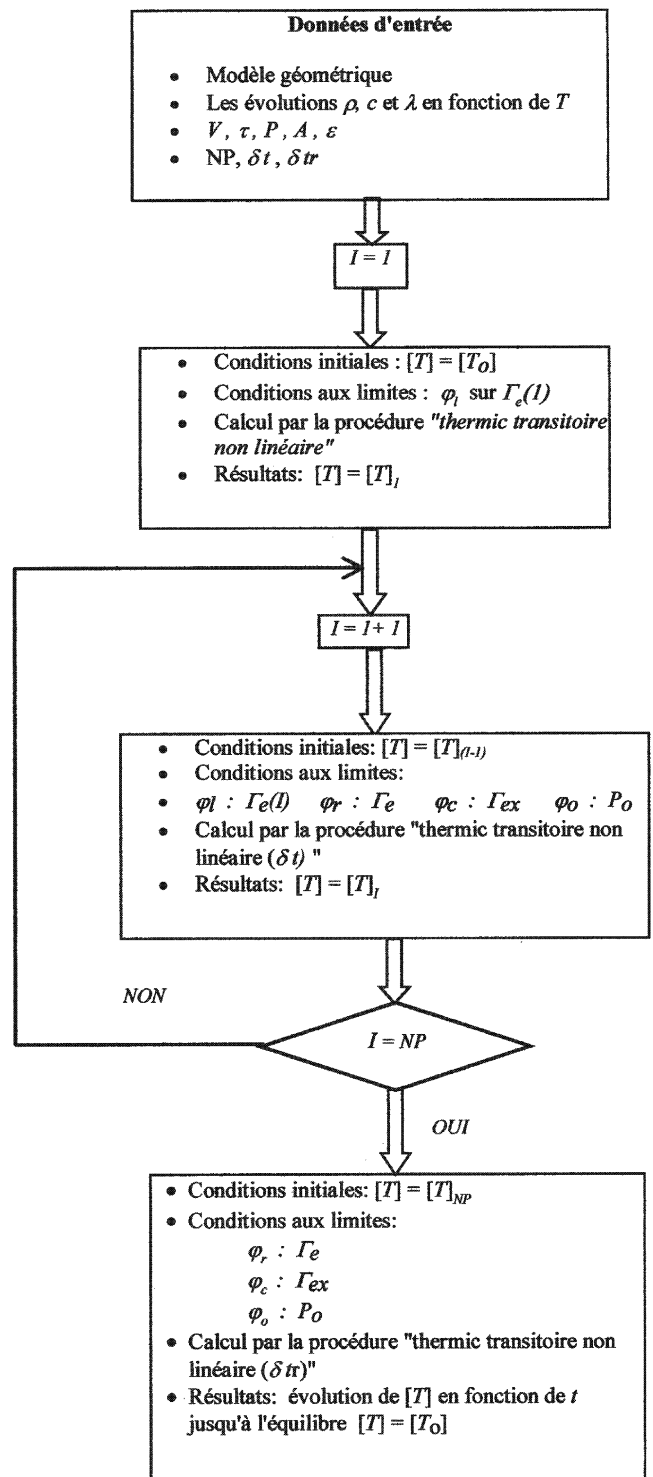


Fig. 5. Organigramme du calcul numérique.

Fig. 5. Flow chart of numerical calculation.

Le deuxième correspondant à la rotation du spot lors du traitement, comporte une boucle d'incrément I et introduit, en plus, le calcul des flux de rayonnement et de convection.

Le troisième bloc est relatif à la phase de refroidissement qui suit la fin du traitement pendant laquelle la dissipation de la chaleur se fait par rayonnement et convection libre jusqu'à

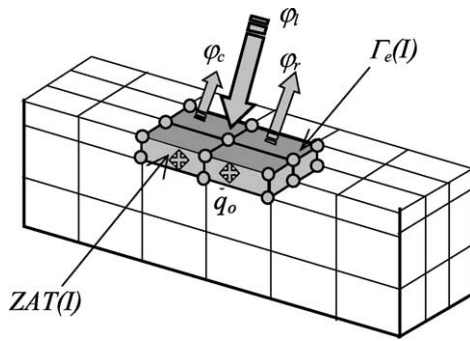


Fig. 6. Zone élémentaire affectée thermiquement.

Fig. 6. Elementary zone affected thermally.

l'équilibre thermique. L'organigramme de la Fig. 5 résume le schéma numérique adopté.

Pour chaque position I et à un instant t donné, on calcule le flux de rayonnement ϕ_r en supposant que le pas de temps δt est suffisamment petit pour permettre un schéma explicite relatif au calcul de ce terme. Moyennant cette hypothèse, on extrait du champ des températures, calculées à l'instant précédent ($t - \delta t$), les valeurs des températures aux nœuds des éléments de Γ_e . A l'intérieur d'une boucle d'incrément J ($1 \leq J \leq NP$), on calcule la température moyenne $\bar{T}(J)$ pour chaque maille $\Gamma_e(J)$ à partir des températures déjà extraites. Dans la même boucle, on calcule le flux $\phi_{rj} = \varepsilon \sigma (\bar{T}^4(J) - T_0^4)$ appliqué sur $\Gamma_e(J)$. Le flux ϕ_r à l'instant t est la somme de tous les flux élémentaires ϕ_{rj} .

L'analyse par la MEF du problème thermique transitoire non linéaire est réalisée à l'aide d'un code standard (CASTEM 2000). Les conditions aux limites sont des conditions de flux imposé ϕ_l et ϕ_r (opérateur «FLUX») et de convection ϕ_c (opérateur «CONVECTION»). La procédure pas-à-pas «thermic transitoire non linéaire» utilise la méthode itérative à deux pas temporels, selon l'algorithme de DUPONT2. Au niveau du deuxième bloc de calcul, le système converge à chaque pas de temps en général après huit itérations.

2.6. La chaleur de changement de phase

Au passage du spot, nous supposons que la chaleur de changement de phase solide $\alpha \rightarrow \gamma$, considérée comme source conditionnelle, est libérée instantanément dans la zone affectée thermiquement ZAT(I) délimitée par $\Gamma_e(I)$ (Fig. 6). Cette approximation est permise vu la petitesse, conversion faite, de \dot{q}_0 devant ϕ_l .

A chaque position I du spot, on introduit dans le volume élémentaire ZAT(I), constitué d'éléments de type CUB8, un terme source volumique \dot{q}_0 (opérateur «SOURCE»).

L'enthalpie de changement de phase $\alpha \rightarrow \gamma$ à 800 °C est d'environ $-2,8 \times 10^8 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ [35]. Pour la raison évoquée, on suppose que la puissance produite par unité de volume est $\dot{q}_0 = q_0/\tau$.

3. Résultats de la simulation numérique

Pour la validation de notre modèle, on présente les résultats d'une simulation avec les paramètres optimaux utilisés lors des essais. Les conditions de traitement optimales adoptées sont définies par un faisceau Laser à distribution uniforme (3,8 mm \times 4 mm), une densité de puissance $P = 3600 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ et une vitesse de défilement du spot $V = 1 \text{ m}\cdot\text{mn}^{-1}$.

Le nombre de positions est $NP = 90$ et la durée d'interférence est $\tau = 0,24 \text{ s}$. Le temps CPU de résolution sur un micro-ordinateur (800 MHz) est d'environ 2 heures. La Fig. 7 montre l'évolution des isothermes et le déplacement du front de la chaleur ainsi que la phase de refroidissement qui débute pour $I = 91$.

La Fig. 8 illustre l'évolution radiale de la température en fonction du temps en un point situé en surface et en deux points situés à 0,3 mm et 0,6 mm de profondeur. Les températures A_1 de transformations eutectoïde de l'acier (début d'austénitisation) et A_3 de transformation allotropique (fin d'austénitisation) sont mises en évidence. Pour les conditions opératoires imposées, on vérifie bien que la température maximale (environ 1100 °C) reste en deçà de la température de fusion. Les Figs. 9 et 10 montrent les champs de température, respectivement sur la surface éclairée et dans une section méridienne du disque.

La Fig. 11 représente l'évolution instantanée de la température en fonction de la profondeur, au passage du spot Laser. Il apparaît sur cette courbe que pour les variables de la simulation, la profondeur de la zone affectée thermiquement définie par une température supérieure à A_1 est de 0,443 mm. La Fig. 12 représente l'évolution de la vitesse instantanée de chauffage et de refroidissement pour les points considérés. Ces courbes montrent que les cinétiques thermiques sont très rapides, supérieures à $2000 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$, notamment celle du refroidissement qui assure ainsi la transformation structurale de l'austénite en martensite.

4. Résultats expérimentaux

4.1. Conditions d'essai

L'éprouvette disque ($\varnothing 60 \text{ mm}$, ép. 6 mm) destinée à des essais de fatigue de contact sur tribomètre rotatif est en acier (EN—35 NiCrMo 16) à l'état trempé et revenu à 600 °C. Le traitement Laser a été réalisé sur une machine outil à commande numérique avec un axe horizontal rotatif autorisant le traitement de la surface latérale des éprouvettes. La source Laser CO₂ (longueur d'onde 10,6 μm , puissance nominale 5 KW) est à flux longitudinal rapide, à répartition énergétique annulaire et mode TEM₀₁. Les conditions opératoires doivent être choisies de façon à provoquer une transformation martensitique sur une profondeur suffisante tout en évitant la fusion locale. Ainsi, la densité de puissance du Laser a été consignée à $3600 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, la vitesse de défilement de

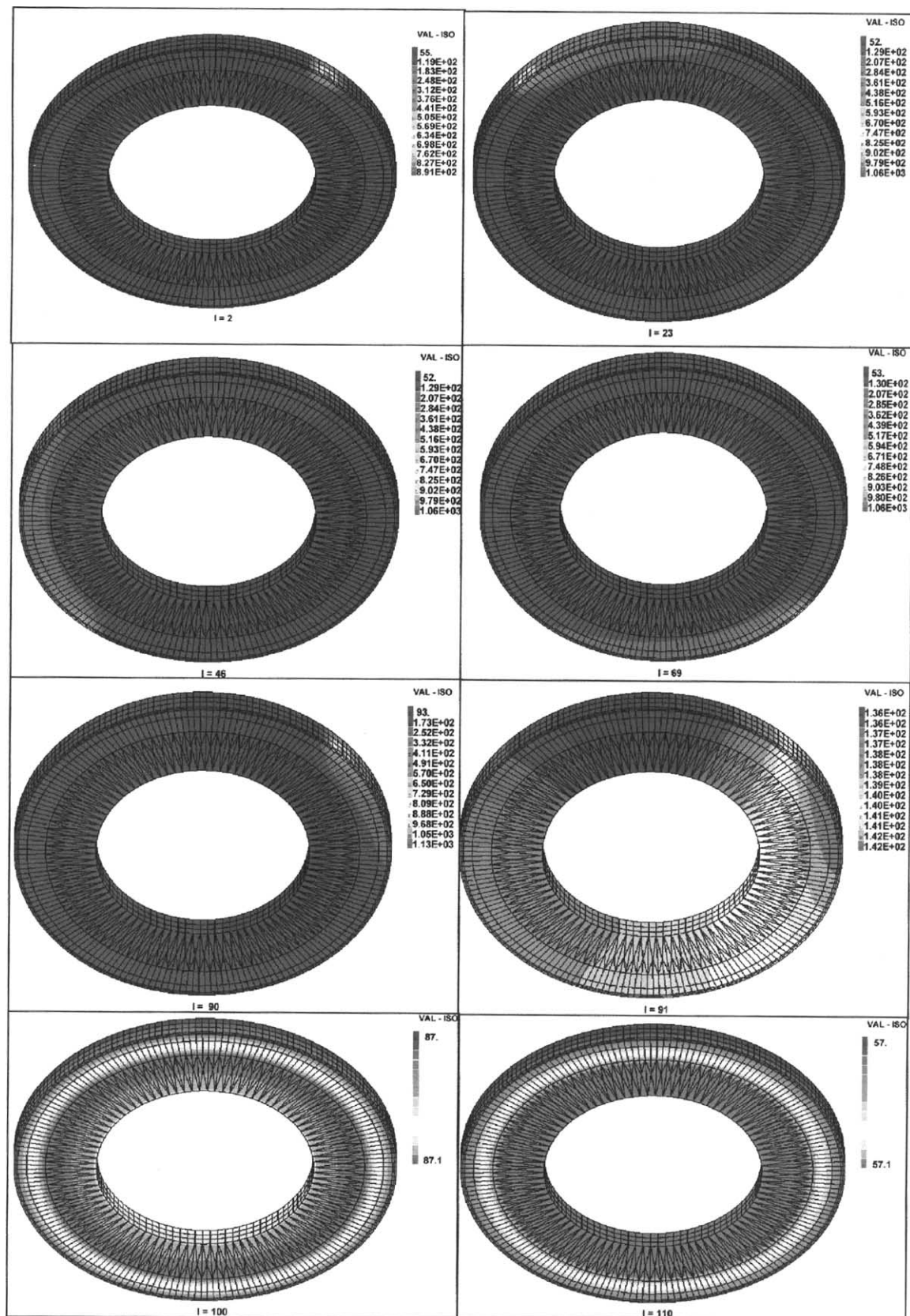


Fig. 7. Evolution des isothermes sur un cycle de traitement thermique.

Fig. 7. Isotherms evolution upon a treatment cycle.

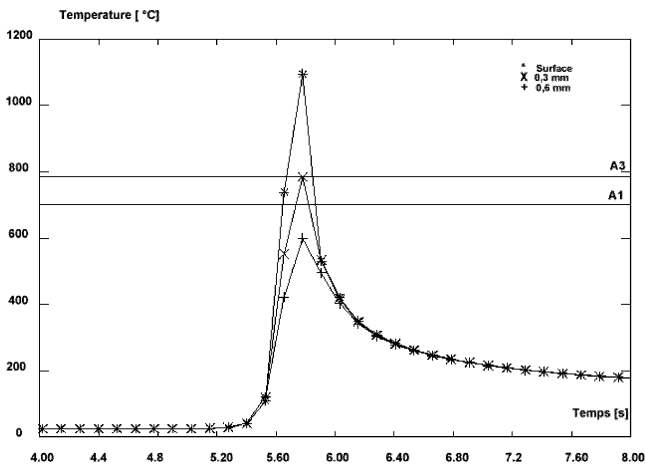
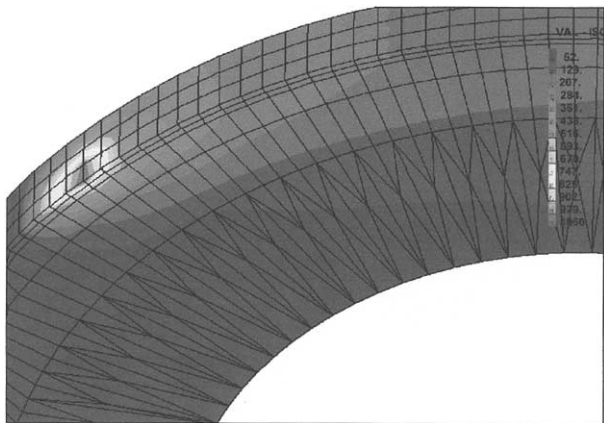


Fig. 8. Températures instantanées au passage du spot et en sous couche.

Fig. 8. Instantaneous temperatures beneath the surface at the spot passing.

Fig. 9. Isovaleurs de la température au passage du spot ($I = 23$).Fig. 9. Temperature field at the spot passing ($I = 23$).

$1 \text{ m} \cdot \text{mn}^{-1}$ et la tache focale à 3,8 mm, conditions identiques à celles de la simulation numérique.

4.2. Caractérisation. Comparaison avec les résultats de la simulation

La caractérisation métallurgique des éprouvettes traitées a porté sur l'identification de la microstructure par microscopie optique et microscopie électronique à balayage et la profondeur de la couche transformée ainsi que, la mesure de la dureté à faible charge.

La micrographie à faible grossissement (Figs. 10 et 13) montre l'étendue et la forme de la zone transformée par le traitement Laser. La zone affectée thermiquement est de forme lenticulaire. Cette forme, due à la répartition de l'énergie du faisceau Laser dans la section de l'éprouvette, rejoint la forme du champ thermique obtenu par simulation numérique (Fig. 10) ce qui concorde avec l'hypothèse de la répartition uniforme.

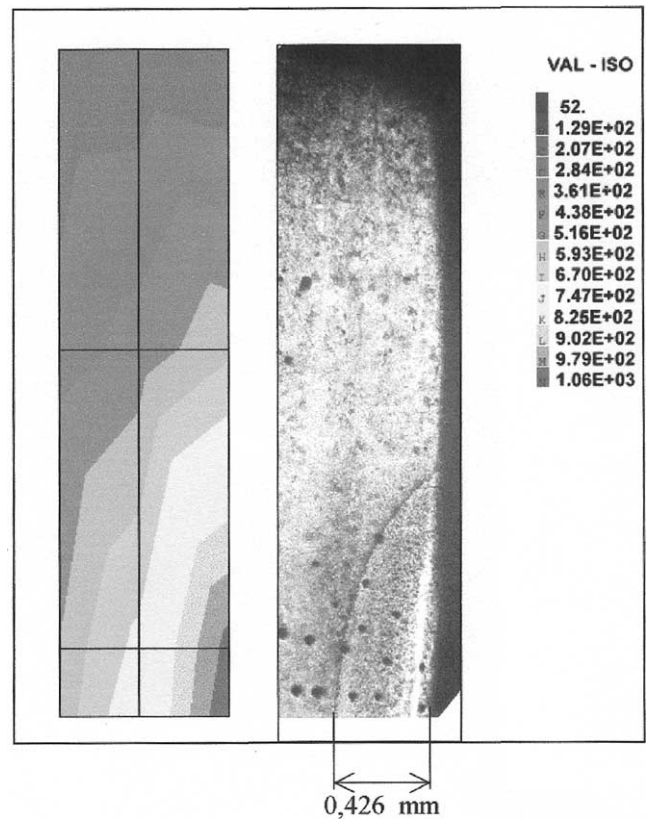


Fig. 10. Isovaleurs de la température dans une section méridienne et micrographie optique présentés à une même échelle.

Fig. 10. Temperature field and micrography at the same scale.

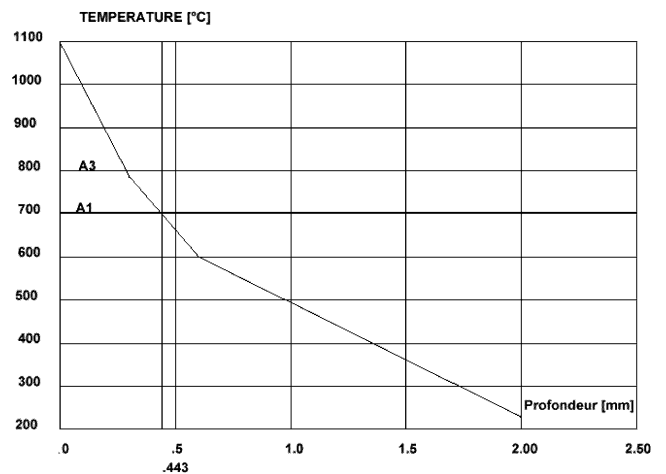


Fig. 11. Evolution radiale de la température instantanée au passage du spot.

Fig. 11. Radial temperature evolution at the spot passing.

L'attaque chimique de cette zone révèle deux régions d'apparences différentes : la première est surfacique et la deuxième est une transition entre la première et le substrat (Fig. 13).

Les micrographies réalisées à fort grossissement confirment la présence des deux régions dans la ZAT et une séparation très franche avec le substrat. La région surfacique

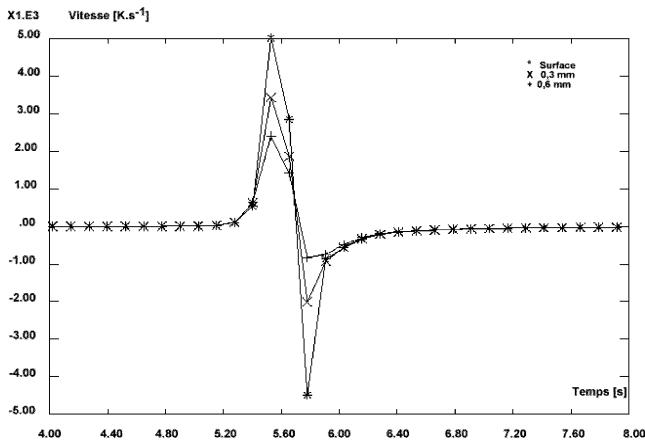


Fig. 12. Evolution de la vitesse instantanée de chauffage et de refroidissement.

Fig. 12. Instantaneous speed of heating and cooling.

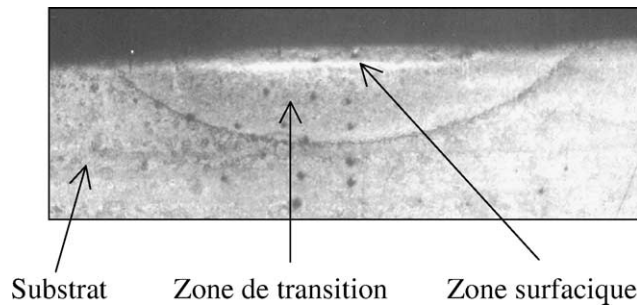


Fig. 13. Micrographie optique révélant la zone affectée par le traitement Laser ($\times 100$).

Fig. 13. Identification by optic micrography of the affected zone by Laser treatment ($\times 100$).

révèle de la martensite (Fig. 14), alors que la région de transition présente une morphologie identique mais plus fine. La profondeur maximale de la ZAT, mesurée à la précision du MEB, est de 0,426 mm.

Les mesures de dureté Vickers (HV) effectuées à faible charge (300 g) sont consignées sur la Fig. 15. Cette dernière montre que cette caractéristique atteint en surface la valeur de 620 ± 20 HV. Celle-ci se maintient sur environ 0,2 mm de profondeur puis diminue progressivement dans la région de transition pour atteindre 350 ± 10 HV, dureté du substrat (état de trempe et revenu à 600°C).

Cette profondeur maximale de la couche traitée, identifiée par la micrographie et confirmée par la dureté est de 0,426 mm. Elle se trouve en très bonne concordance avec les résultats de la simulation (0,443 mm), l'écart étant relativement faible (3%).

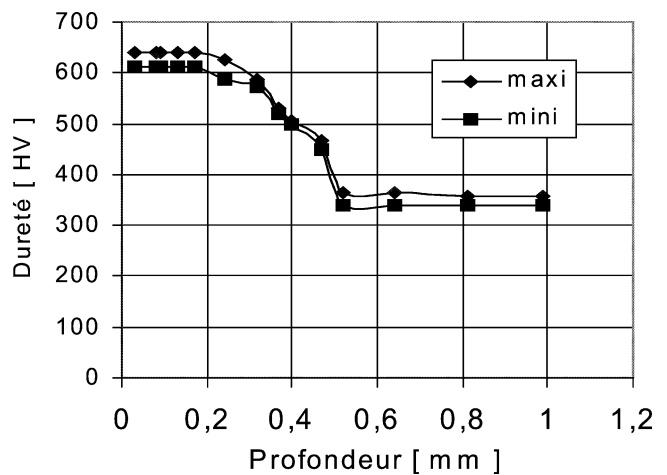


Fig. 15. Courbe de la dureté mesurée en fonction de la profondeur.

Fig. 15. Hardness curve function of depth.

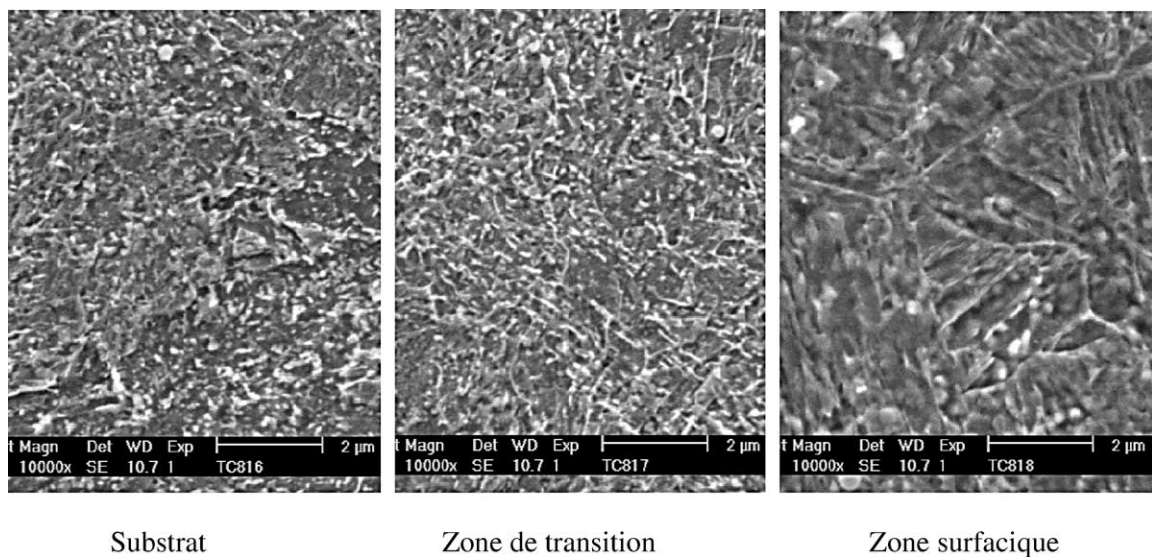


Fig. 14. Micrographie électronique à balayage de la martensite dans les trois zones ($\times 10000$).

Fig. 14. SEM of martensite in the three zones ($\times 10000$).

La dureté relevée en surface (620 ± 20 HV) et maintenue dans toute la première région de la ZAT correspond à celle de la martensite du même acier trempé dans les conditions d'austénitisation complète. Ceci prouve que cette première région est totalement austénitisée à une température supérieure à la température A_3 de l'acier. Dans ces conditions les éléments d'alliages se mettent en solution solide dans la maille de l'austénite avant que la trempe de cette zone n'ait lieu.

Quant à la deuxième région révélée par la micrographie, correspondant à une martensite plus fine, elle est marquée par une diminution de la dureté avec la profondeur. Cette diminution est associée à une austénitisation partielle depuis le domaine mixte ($\alpha + \gamma$) de l'acier où la température est comprise entre A_1 et A_3 . Le refroidissement rapide de cette zone transforme les grains γ en martensite en conservant la ferrite dans la structure. La présence de cette ferrite est d'autant plus importante que la température atteinte dans cette zone est proche de A_1 et que la dureté est plus faible.

Les résultats expérimentaux des essais réalisés sur les éprouvettes confirment les résultats du modèle numérique. La précision atteinte traduit le réalisme du modèle numérique adopté.

5. Conclusions

Le traitement d'un disque de petite dimension, sur sa face latérale à l'aide d'un mouvement circulaire du spot ne peut pas être simulé directement par les formulations analytiques établies en régime stationnaire pour les pièces massives dans un repère lié au spot.

Le modèle numérique instationnaire proposé nécessite un maillage fin le long de toute la trajectoire de la source mobile et repose sur un ensemble de calculs itératifs associés à chaque position de la source. Il exige, de ce fait, une puissance de calcul relativement importante devenue actuellement accessible grâce à l'évolution importante des moyens de calcul.

Ce modèle permet une simulation fine de l'histoire thermique totale d'un traitement par une source Laser mobile en réactualisant à chaque pas les conditions initiales et de frontières. Il permettrait notamment d'accéder aux champs de température dans le cas de pièces dont le traitement fait apparaître des interférences entre les zones traitées successivement tel que le recouvrement qui se produit au point initial d'une trajectoire fermée du spot ou lors des traitements multi-passes.

La connaissance de cette histoire jusqu'au retour à la température ambiante est nécessaire notamment si on envisage d'adopter un couplage avec un modèle de thermo-viscoplasticité pour suivre l'évolution du champ de contrainte instantané et, à terme, déterminer l'état de contrainte résiduel en régime permanent après refroidissement. Cette phase de refroidissement est déterminante pour l'évaluation rigou-

reuse et précise de l'état de contrainte résiduel et doit être considérée à partir de la position finale du spot en fin de cycle.

En réponse à la principale difficulté évoquée par plusieurs auteurs, concernant l'adoption de conditions aux limites qui traduisent réellement les phénomènes physiques, ce modèle permet, moyennant le schéma numérique proposé, de résoudre l'équation de la chaleur en régime instationnaire dans un domaine tridimensionnel avec une condition aux limites évolutive. La finesse de la discrétisation spatio-temporelle permet de décrire les forts gradients thermiques créés sous le faisceau Laser ainsi que les champs de températures dans tout le domaine.

La prise en compte de l'évolution des caractéristiques thermophysiques en fonction de la température, des pertes par rayonnement et de la chaleur latente de transformation de phase solide, confère à ce modèle un caractère quasi général pour la simulation des traitements thermiques superficiels par Laser. En particulier, il est possible d'utiliser ce modèle pour simuler le traitement d'une pièce de forme quelconque, ayant des dimensions finies, sans passer par l'hypothèse d'un milieu semi-infini.

Ce modèle peut être étendu pour la résolution d'autres types de problèmes thermiques avec des conditions de frontière mobiles.

Abridged English version

Heat transient model for surface treatment by a moving Laser source

The efficiency of steel heat treatment by powerful CO₂ Laser is first conditioned by a controlling capacity of the evolution in space and time of temperature fields induced within the material. Henceforth, numerical methods would enable optimising and influence controlling of most treatment parameters.

In this way, the idealisation of such treatment passes throughout the resolution of the heat equation in respect of non-linear boundary condition corresponding to a moving Laser source upon the surface lighted. Several authors had used analytical solutions under a simplifying assumption of infinite half-space. Thus, the problem admits a steady solution into a datum attached to the Laser source.

The transient numerical model proposed in this paper, would enable the simulation of all thermal history with better accuracy at any point of the solid, from the beginning to the end of treatment at the thermal equilibrium. The numerical scheme set, integrating FEM standard code, permits the resolution of the heat equation for specific conditions, i.e., moving non-linear boundary conditions, without any assumption upon geometry, in consideration of suitable space and time mesh. This scheme takes into account the non-linearity in relation with the variations of thermophysics properties with temperature and losses by

radiation and convection. The heat of solid phase changing is introduced as conditional sources into the thermal affected zone.

The test-piece used for application, consists of a disc which rotates around its revolution axis with a constant angular velocity. The Laser beam is applied on the lateral surface of the disc. The geometric model is formed by a non-uniform 3D mesh (Fig. 2), in relation with spot dimensions (Fig. 3). The numerical scheme involves three calculating blocks as shown by Fig. 5. The resolution of the non-linear system obtained is achieved by FEM.

Fig. 7 shows the evolution of isotherms and shifting of the heat front. Fig. 11 illustrates the evolution of the instantaneous temperature on surface and with radial depth, it shows that the thermal affected zone defined by a temperature greater than $A1$ concerns nearly a depth of 0.443 mm.

Several experiments based on microstructural identification and the measure of toughness of treated samples, confirms the reliability of the numerical model results.

As an answer to the main difficulty mentioned by several authors, about assuming realistic boundary conditions expressing the real physics phenomena, this model enables the resolution of heat equation in transient condition within a three-dimensional domain with evolutive boundary conditions. The fineness of the space and time meshing authorise the description of the great gradients created under the Laser beam.

It is possible to use this approach for treatment simulation of a part with any shape and dimensions, without considering the hypothesis of an infinite half space.

Références

- [1] J. Merlin, Transformation et caractérisation d'un faisceau Laser CO₂ pour des applications en traitement des matériaux, in: *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, 1991.
- [2] M. Laurent, Transferts d'énergie en soudage Laser, in: *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, 1991.
- [3] M. Boufoussi, Modélisation du traitement thermique superficiel en phase solide par faisceau Laser, in: *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, 1991.
- [4] E. Geissler, H.W. Bergmann, Temperature fields in laser transformation hardening-quasi stationary fields, *Opto Electronik Makazin* 4 (4) (1988) 25–32.
- [5] M. Debuigne, Modélisation thermomécanique des traitements de durcissement superficiel en phase solide par laser CO₂ continu—Application et validation dans le cas de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, Thèse, C.E.C.M./C.N.R.S., 1988.
- [6] M. Debuigne, E. Kerrand, Modélisation des transferts thermiques appliquée au durcissement d'aciers par Laser CO₂ de puissance, *Mémoires et Études Scientifiques, Rev. Métallurgie* (Avril) (1987) 223–232.
- [7] D. Farias, Modélisation des transformations de phases des aciers en cycles thermiques rapides, in: *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, 1991.
- [8] D. Kechemair, Différentes stratégies pour le contrôle des procédés de traitement des matériaux par laser de puissance, in: *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, 1991.
- [9] B.L. Mordike, Surface treatment by lasers, in: *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, 1991.
- [10] F. Fouquet, L. Renaud, C. Nicot, J. Merlin, Traitement thermique superficiel d'une fonte grise perlitique par faisceau Laser, *Mémoires et Études Scientifiques, Rev. Métallurgie* (Janvier) (1991) 23–31.
- [11] P. Sallamand, J.M. Pelletier, A.B. Vannes, Surface modifications by Laser: Improvement of tribological properties by Laser cladding, in: *Proceeding SMT 8, Nice*, 26–28 September 1994.
- [12] B. Vannes, Critères de choix d'un traitement superficiel : Application aux traitements sous faisceaux Lasers, *Journée Technico-Scientifique Italo-Franco-Suisse*, Turin 11 (Octobre) (1996).
- [13] F. Follo, W. Kurz, G. Barbezat, Laser surface preparation for thermal spray deposition, in: *Proceeding of the 7th European Conf. of Laser Treatment on Materials (ECLAT '98)*, Hannover, 22–23 September 1998.
- [14] H. Adnani-Amordjia, D. Abdi, A. Boucenna, Conditions de traitement thermique de l'alliage de titane TA6V sous faisceau Laser CO₂ de puissance, *Ann. Chim. Sci. Matér.* 24 (7) (1999).
- [15] H. Adnani-Amordjia, D. Abdi, A. Boucenna, Corrélation entre les conditions de traitement thermique par Laser CO₂ de puissance et les modifications structurales de surface d'alliage de titane TA6V, *Ann. Chim. Sci. Matér.* 24 (2) (1999).
- [16] M. Rappaz, Les données générales de la simulation dans le traitement Laser, in: *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, 1991.
- [17] Manuel de CASTEM 2000, Chapitre ARCGAU, CEA, 11 Mai 1995.
- [18] Brochure d'information, ESI Group, Mars 2001.
- [19] J. Merlin, J.J. Schwarz, Caractérisation d'un faisceau Laser en vue d'applications à caractère métallurgique, *Mécanique Matériaux Electricité* 430 (Avril–Mai) (1989) 26–31.
- [20] Y. Jiang, Influence de la microstructure initiale des aciers sur les résultats de leurs traitements thermiques superficiels par Laser de puissance : Application aux aciers 27CD4, 42CD4 et XC42, Thèse, E.C.P., 1990.
- [21] Y. Guan, Traitements superficiels des fontes G.S. par Laser de puissance, influence sur la microstructure et la tenue en fatigue, modélisation thermique, Thèse, E.C.P., 1991.
- [22] H.E. Cline, T.R. Anthony, Heat treating and melting material with a scanning Laser or electron beam, *J. Appl. Phys.* 48 (9) (1977) 3895–3900.
- [23] F.C. Seaman, D.S. Gnanamuthu, Using an industrial laser to surface Harden an Alloy, *Metal Progress* 108 (3) (1975) 67–74.
- [24] W.M. Steen, C. Courtney, Surface heat treatment of En8 steel using a 2 kw continuous-wave CO₂ Laser, *Metal Technology* (12) (1979) 456–461.
- [25] W.M. Steen, J. Powell, Laser surface treatment, *Materials Engrg.* 2 (Mars) (1981) 157–162.
- [26] S. Kou, D.K. Sun, Y.P. Le, A fundamental study of Laser transformation hardening, *Metallurgical Trans. A* 14 (April) (1983) 643–653.
- [27] B.L. Mordike, State of the art of surface engineering with high energy beams, in: *Proceedings of 2nd IFHT International Seminar*, Lisbon, Portugal, 25–27 September 1989, pp. 13–25.
- [28] J. Mazumder, W.M. Steen, Heat transfer model for CW Laser material processing, *J. Appl. Phys.* 51 (2) (1980) 941–947.
- [29] J. Mazumder, Laser heat treatment: The state of the art, *J. Metals* (May) (1983) 18–25.

- [30] A. Richard, Traitement de trempe superficielle par Laser du zircaloy, Thèse, Paris Sud, 1986.
- [31] A. Sakout, Etude théorique et expérimentale du soudage par Laser, modélisation des transferts thermiques, Thèse de docteur, Université Lyon 1, Mai 1987.
- [32] D. Kechemair, Instrumentation et optimisation de la trempe superficielle des aciers par Laser CO₂, Thèse, Paris XI, 1989.
- [33] D. Farias, Traitement thermique par Laser CO₂ et modélisation des transformations des phases : Cycles rapides au chauffage et au refroidissement, Thèse, ENSAM, 1991.
- [34] M. Theobalt, P. Merrien, F. Leroy, J.L. Lebrun, T. Puig, L. Castex, Résistance à la fatigue d'aciers de construction traités par trempe Laser, Contraintes résiduelles et nouvelles technologies, CETIM, Senlis 5 et 6 Septembre 1990.
- [35] G.H. Harth, W.C. Leslie, V.G. Gregson, A. Sanders, Laser heat treating of steel, J.O.M. (4) (1976) 5–11.