Modelización de las transformaciones de fase en el proceso de endurecimiento de aceros con láser de CO₂

J.M. Amado*, C. Álvarez*, G. Nicolás*, A.J. López*, J.A. Pérez*, A. Ramil*, E. Saavedra*, J. Sanesteban*, M.J. Tobar* y A. Yáñez*

Resumen

Los procesos de endurecimiento superficial de aceros dependen de los ritmos de calentamiento y enfriamiento del material, que han de ser rápidos. En el endurecimiento por láser, el rápido calentamiento viene asegurado por la elevada densidad de potencia del haz láser incidiendo sobre un pequeño volumen de la pieza, mientras que el flujo de calor por conducción hacia el resto del material ayuda a producir un rápido ritmo de enfriamiento. En este artículo, los ciclos térmicos se determinan con la ayuda de un modelo de elementos finitos que calcula la evolución de la temperatura en los diferentes puntos del material durante el proceso de tratamiento con láser. Para la predicción del endurecimiento son necesarios los diagramas de calentamiento isotermo (IT) para su aplicación durante el calentamiento; la cuantificación de las transformaciones se realiza en una serie de pasos isotermos conectados con otros de fracción de volumen constante; el porcentaje de cada fase se calcula utilizando la ley de Johnson-Mehl y Avrami. En el enfriamiento se utilizan los diagramas TTT a la manera que se hacía con los IT en el calentamiento. Se valida el modelo utilizando una serie de datos experimentales donde se muestran, de un lado, el mapa de durezas producto del tratamiento de una pieza plana de AISI 1045 con láser de CO2 y, de otro, el mapa de concentración de martensita obtenida a partir del modelado de ese mismo proceso. La coincidencia entre ambos mapas permite una primera validación del modelo presentado.

Palabras clave Endurecimiento por láser. Modelo de elementos finitos. Transmisión de calor.

Steel phase transformation in the CO₂ laser hardening process

Abstract

Hardening processes of steel are very dependent on the heating and cooling rates, in both cases high rates are needed. In the laser hardening the power density of the laser beam is responsible of the fast heating of the material; fast cooling is achieved due to the heat conduction from the region being treated to the bulk of the workpiece. Within this work thermal cycles are determined with a Finite Element Model which computes the temperature of the material during the laser treatment. For the prediction of the hardening IT diagrams are applied, isothermal steps are connected with constant volume fraction steps; the content of each phase is computed in the framework of the Johnson-Mehl and Avrami law. During the cooling process, a similar procedure is applied but now using TTT diagrams. Model validation is done comparing, on a local basis, microhardness measurement on a treated workpiece with the martensite concentration extracted from the model.

Keywords

Laser hardening. Finite element modelling. Heat transfer.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales de tratamiento de materiales con láser más tradicionales son el corte, la soldadura, el taladrado y los tratamientos super-

ficiales, los cuales han sido ya estudiados, tanto de manera teórica como experimental^[1 y 2]. Como denominador común a todos ellos es necesario hacer notar que los parámetros experimentales que han de ser ajustados son la potencia incidente, la

^(*) Departamento de Ingeniería Industrial II. Universidad de La Coruña. Ferrol.

velocidad relativa entre la pieza y el haz y el diámetro de este último. En este trabajo se trata de la modelización, mediante la serie de pasos que a continuación se detallan, del endurecimiento del acero AISI 1045.

En el contexto de la modelización llevada a acabo en el presente trabajo el haz láser se considera como una fuente de calor en movimiento con una distribución de intensidad bien conocida que induce una serie de condiciones de contorno sobre la superficie del material. Este modelo incluye efectos realistas tales como propiedades termofísicas dependientes de la temperatura (calor específico, densidad y conductividad térmica). La simulación del haz incluye la distribución espacial de su energía que es la que corresponde al modo TEM_{01*} (Fig. 1). Los resultados de estos procesos son seguidamente analizados sobre la base de modelos matemáticos que calculan las transformaciones de fase de los aceros durante el calentamiento y enfriamiento que tienen lugar durante el proceso. La realización experimental final del proceso se hace de acuerdo con los parámetros utilizados en la simulación.

En lo que sigue se presentará el modelo propuesto junto con alguno de los resultados obtenidos que sirven para la validación del mismo.

2. MODELIZACIÓN DEL PROCESO

Cuando la superficie de la pieza de trabajo es irradiada se induce en la misma pieza un campo de temperaturas dependiente del tiempo. El modelo del proceso, en un primer paso, resuelve la ecuación de conducción del calor para el caso de una fuente dependiente de la posición y del tiempo $f(\mathbf{r},t)$

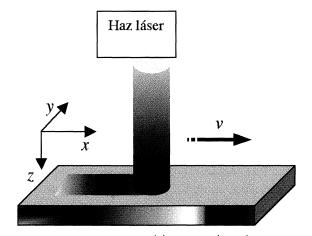


Figura 1. Vista esquemática del proceso de endurecimiento por láser.

Figure 1. Scheme of the laser hardening process.

366

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla (-K\nabla T) = f(\mathbf{r}, t) \tag{1}$$

Si las propiedades termofísicas del material tratado son independientes de la temperatura y de la posición (homegeneidad) y $\kappa = K/\rho c$ es la difusividad térmica, la ecuación toma la forma más sencilla

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^2 T = f(\mathbf{r}, t) \tag{2}$$

Si se trata de resolver problemas de transmisión de calor de configuraciones geométricas sencillas, donde, además, las propiedades termofísicas del material son independientes de la temperatura, se utiliza un modelo analítico basado en la función de Green. Cuando se trata de geometrías más complejas y/o se quieren incluir los efectos producidos por la dependencia en temperatura de las propiedades anteriores, es necesario recurrir a un modelo de elementos finitos^[3].

En la segunda fase del trabajo se modelizan las transformaciones de fase^[4]. Para cuantificar dichas transformaciones durante el calentamiento se aplica el principio de aditividad, en el que se discretiza la curva de temperatura en una serie de pasos isotermos conectados por otros de fracción de volumen constante^[5], lo que combinado con los diagramas IT permite calcular la cantidad de austenita formada a partir de la perlita y la ferrita inicialmente presentes en la probeta tratada. En cada paso isotermo se calcula el porcentaje de fase formado a través de la ecuación de Jonson-Mehl y Avrami. En el enfriamiento se produce exclusivamente una transformación martensítica, que también se determina haciendo uso, en este caso, de los diagramas de transformación TTT. Con todo ello se calcula la concentración de martensita en función de la posición para cualquier punto de la pieza tratada que se compara con el mapa de durezas obtenido experimentalmente.

3. RESULTADOS

Para validar la modelización realizada se pasó al tratamiento de una serie de piezas de acero AISI 1045, en forma de ortoedro de dimensiones $40 \times 60 \times 10 \text{ mm}^3$, dado el buen conocimiento que se tienen de sus propiedades termofísicas y de la disponibilidad de los diagramas TTT e IT $^{[6]}$. Como primer acercamiento al problema se simuló el proceso de acuerdo con los parámetros experimentales de la tabla I.

Rev. Metal. Madrid 40 (2004) 365-368

Tabla I. Parámetros del proceso *Table I. Process parameters*

Potencia	Diámetro de haz	Velocidad relativa haz-pieza
1900 W	3,5 mm	10 mm/s

Otro aspecto de importancia, a la hora de realizar una validación del modelo, es el conocimiento de la fracción de energía liberada por el haz, que es absorbida por el material tratado. Esa fracción viene determinada por el coeficiente de absorción α dependiente de la longitud de onda incidente, de la temperatura de la superficie y del ángulo de incidencia del haz, todas ellas, prácticamente constantes, cuando el proceso está en régimen permanente. De esta manera se puede utilizar un coeficiente de absorción efectivo α = 0,55. El proceso de endurecimiento estudiado aparece como estacionario en un sistema de referencia en el que el haz se encuentra en reposo y es la pieza la que se mueve. Para garantizar que el proceso siga esta evolución es necesario que la temperatura máxima alcanzada en la superficie de la pieza mantenga un valor constante durante todo el proceso. Éste, es el primer rasgo del proceso que ha de reproducir el modelo^[3].

Si ahora el observador está en reposo con respecto a la pieza tratada, lo que se encuentra es que cada punto del material experimenta un ciclo térmico que, a su vez, es el responsable de las propiedades que adquirirá el material tras el tratamiento. Los ciclos térmicos experimentados por cada punto dependen de su posición con respecto al centro del haz láser. Se ha representado, en la figura 2, el cambio de estos ciclos térmicos conforme se avanza en profundidad en la vertical del punto de máxima temperatura sobre la superficie de la pieza.

Previo al análisis de los ciclos térmicos, hay una condición necesaria para que tenga lugar el endurecimiento de la pieza y es que se superen las temperaturas denominadas Ac1 y Ac3, umbrales a alcanzar para que se inicien las transformaciones de fase en el acero. Esta condición es necesaria pero no suficiente; son las velocidades de calentamiento y enfriamiento las que determinarán las características del endurecimiento alcanzado. Este endurecimiento vendrá determinado por la concentración de martensita obtenida (Fig. 3). Se presenta una sección perpendicular al haz, puesto que el régimen permanente alcanzado asegura la equivalencia de todas las secciones tratadas, paralelas a la representada.

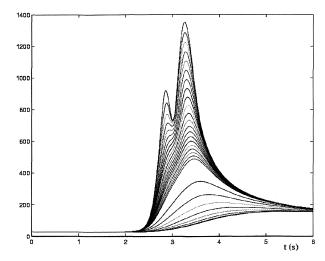


Figura 2. Ciclos térmicos experimentados por diferentes puntos del material.

Figure 2. Thermal cycles at different depths on the treated material.

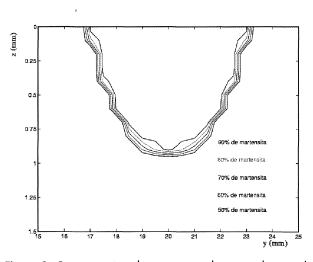


Figura 3. Concentración de martensita determinada con el modelo propuesto en una sección perpendicular al haz.

Figure 3. Cross section of the martensite concentration in the treated material.

Una primera validación del resultado puede realizarse de acuerdo con la microdureza alcanzada en el material. Para ello, se barrió una sección de una probeta tratada según los parámetros de la tabla I, que fue cortada de manera que la sección medida en la figura 4 coincidiese con la representada en la figura 3. El modelo tiende a sobreestimar la profundidad y anchura templada pero los resultados obtenidos permiten establecer la validez del modelo con pequeñas discrepancias que no superan el 10 % en la anchura de la zona templada y el 15 % en profundidad. Como último punto se presentan resultados del análisis metalográfico de esa misma

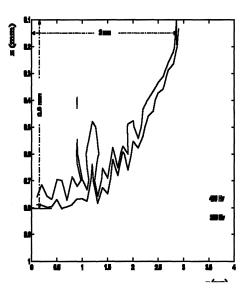


Figura 4. Validación del modelo: Mapa de microdurezas.

Figure 4. Model validation: microhardness map.

sección, se muestra la sección completa, detalles de la región donde el modelo predice la completa transformación en martensita y de la región de transición o zona térmicamente afectada (Fig. 5).

5. CONCLUSIONES

La técnica numérica utilizada, permite tener un elevado grado de predicción sobre la forma de la región tratada y sobre la concentración de martensita en esa misma zona. El modelo permite establecer cuales son los valores adecuados para los parámetros del proceso y conocer el mapa de temperaturas así como la evolución temporal del mismo. Del análisis de los ciclos térmicos puede extraerse la metalurgia de la transformación, obteniéndose la concentración de las fases presentes.

De entre ellas, se destaca la proporción de martensita obtenida como principal responsable de la dureza alcanzada. Las ventajas de la utilización del modelo son, como tantas veces, la posibilidad de minimizar pruebas experimentales y la capacidad de analizar el proceso térmico y metalúrgico con una profundidad inalcanzable por medios experimentales. La validación realizada da lugar a que el modelo pueda ser utilizado con más que notables garantías, como herramienta predictiva.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a la subvención obtenida del Ministerio de Ciencia y Tecnología y Fondos FEDER (1FD97-2020-C03-03), del Programa Ramón y Cajal de ese mismo Ministerio. Los autores quieren agradecer al Centro de Supercomputación de Galicia toda la ayuda prestada en la realización de la parte computacional de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] C. MOLPECERES, R. CATALINA y J.L. OCAÑA, Rev. Metal. Madrid, 38 (2002) 195-204.
- [2] G. Muñiz, A. Conde, B.J. Fernández, R. Varela, I. García y J. de Damborenea, Rev. Metal. Madrid, 39 (2003) 443-451.
- [3] A. YÁNEZ et al., Appl. Surf. Sci. 186 (2002) 611.
- [4] K.F. WANG, S. CHANDRASEKAR y H.T.Y. YANG, JMSE 119 (1997) 257-265.
- [5] M. MELANDER y J. NICOLOV, Am. Soc. Met. 4 (1985).
- [6] C.J. SMITHELLS, Smithells metals reference book, 7th edition, E.A. Brandes and G.B. Brooks (Eds.), Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992.

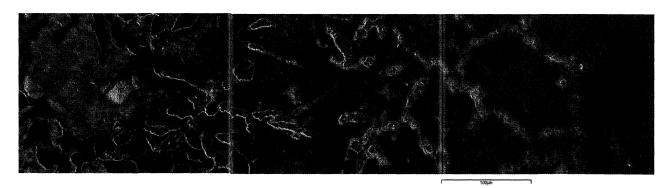


Figura 5. Corte metalográfico de la sección tratada, a la izquierda se aprecia la región de transición, a la derecha la zona endurecida.

Figure 5. Metallographical cut of the treated material, on the left hand side the transition region, on the right the hardened zone.