

Modelación del endurecimiento superficial por láser del acero AISI W112 mediante el método de elementos finitos

David Coureaux Mustelier^A, Roberto Sagaró Zamora^B, Alberto Juy Aguirre^B, Calixto Rodríguez Martínez^B

^ADepartamento de Ciencias de Materiales, Escuela de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

^BGrupo Tribológico, Departamento de Mecánica y Diseño, Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba
dacm50@yahoo.es, sagaro2001@yahoo.com

RESUMEN

Los procesos de endurecimiento superficial de aceros requieren ritmos de calentamiento y enfriamiento rápidos. En el endurecimiento por el temple superficial empleando energía láser se induce un calentamiento rápido debido a la elevada potencia del haz 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. El presente trabajo tiene por objeto estimar mediante el método de elementos finitos el endurecimiento superficial por láser, evaluando la influencia de la potencia, del diámetro del haz y de la velocidad de barrido sobre la superficie, en las dimensiones de la zona afectada por el calor (ZAC), microestructura y dureza de la superficie tratada. Se valida el modelo utilizando una serie de datos experimentales producto del tratamiento de piezas planas de AISI W112 con láser de Nd: YAG.

PALABRAS CLAVE

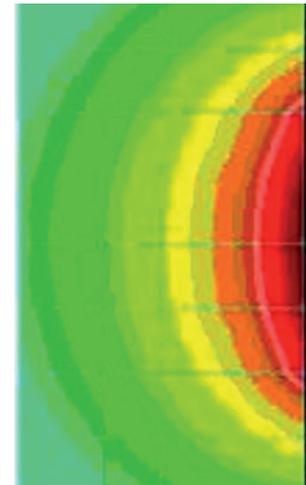
Endurecimiento por láser, Modelo de elementos finitos, zonas afectadas por el calor, temple superficial.

ABSTRACT

Hardening processes of steels are require high heating and cooling rates; in the laser hardening the power density of the beam is responsible for the quick heating of the material; rapid cooling is achieved due to the heat conduction to the bulk of the workpiece. The aim of this work was to estimate by means of heat transfer and parametric design capabilities of the finite element method the influence power laser density, incident beam diameter and scan speed on the dimensions heat-affected zones (HAZ), microstructure and hardness in treated surface. Model calculations are compared with experimental results of a surface thermal treatment with an Nd: YAG laser of AISI W112 steel plates.

KEYWORDS

Laser hardening, finite element model, heat-affected zones, surface hardening.



INTRODUCCIÓN

Actualmente las modificaciones con láser para mejorar la superficie de los materiales metálicos se pueden resumir en tres aplicaciones fundamentales: endurecimiento superficial de metales, las aleaciones y los recubrimientos superficiales.

El endurecimiento superficial con laser es una de las aplicaciones más exitosa y que ha abierto nuevas posibilidades para mejorar las características del servicio de piezas y equipos mecánicos. El proceso aprovecha dos propiedades esenciales del tratamiento láser: el rápido calentamiento conseguido por las elevadas densidades de energía suministrada por el haz y el rápido enfriamiento producido por la conducción del calor hacia el interior de la pieza, de esta forma es posible obtener una elevada dureza en una superficie controlada sin distorsión térmica en el resto de la superficie y un núcleo blando y tenaz.

La modelación realizada en esta investigación incluye los efectos de propiedades termofísicas dependientes de la temperatura (calor específico, densidad y conductividad térmica). Como complemento a la modelación del tratamiento se realizaron de manera experimental un serie de ensayos con el objetivo de evaluar la influencia de los parámetros operacionales del láser en las dimensiones y propiedades de la zona afectada por el calor (ZAC).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para los ensayos experimentales se utilizó la instalación láser LTI 702, acoplada a una mesa XY donde el haz incide de manera perpendicular sobre la muestra mediante una óptica de enfoque, (figura 1), cuyas características se muestran en la tabla I.

El material empleado en la investigación fue el acero AISI W112 (tabla II). Se utilizaron probetas de forma rectangular (40x10x10) mm rectificadas para su tratamiento. Para mejorar la absorción del calor la superficie de las probetas a irradiar se cubrió con negro de hollín.

Los experimentos fueron realizados con arreglo a un diseño de experimentos factorial 2^k de tres factores (k) con dos niveles (n) cada uno con el marcado propósito de correlacionar la penetración del endurecimiento (PE) con los parámetros operacionales del láser. Los niveles de las variables empleadas en los ensayos se presentan en la tabla III.

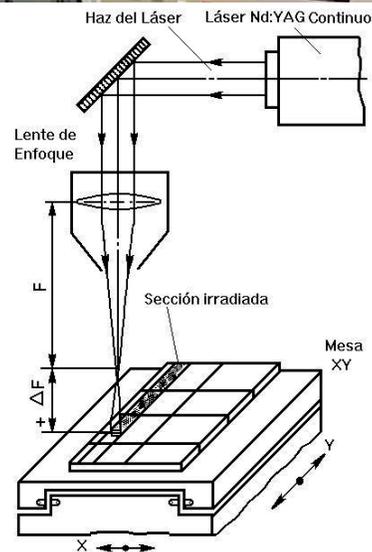


Fig. 1. Instalación para temple superficial con láser (TSL).

Tabla I. Parámetros del equipo láser continuo LTI 702.

Longitud de onda: 1060 nm	Potencia de salida generalizada
Diámetro: 3 mm	Rango de potencia: 0-120W
Divergencia: 2×10^{-3} rad	Modo: TEM ₀₁
Régimen de trabajo:	continuo

Tabla II. Composición química del acero AISI W112.

Elementos	Acero W112
C (%)	1.25-1.35
Mn (%)	0.15-0.35
Cr (%)	<0.15
Ni (%)	---
Ti (%)	---
T* (%)	780
Dureza (HV)	224

* Temperatura de transformación.

Tabla III. Arreglo del diseño factorial para el acero AISI W112.

Variables			
Niveles	Potencia (W)	Diámetro del haz (mm)	Velocidad (mm/s)
-1	60	0.60	1.00
0	80	1.10	1.25
1	100	1.60	1.50

MODELADO DEL PROCESO

En este trabajo, la valoración del tratamiento térmico se basa en las suposiciones siguientes:¹

- La distribución del flujo de calor producto al haz láser se comporta como una distribución Gaussiana.
- El material tratado es homogéneo.
- Las características termofísicas son dependientes en temperatura.
- Medio semi-infinito.

La modelación se tratará de manera bidimensional, el efecto de la entalpía en la transformación de la austenita en martensita no será tomada en cuenta, por tanto la ecuación (1) tomará la siguiente forma:¹

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Para el cumplimiento de la simetría del modelo además se debe cumplir que el flujo de calor, en la dirección (r), es igual tanto del lado izquierdo como del lado derecho de una manera continua e inmediatamente igual, a medida que se transcurra desde el centro de la fuente de calor hasta la distancia exterior del haz láser (figura 2); La región $Z=\infty$ es considerada como una región semi-infinita:

$$T(i, \infty, t) = T(\infty, j, t) = T_{env} \quad (2)$$

i = Posición con respecto a la dirección del radio (r)

j = Posición en cuanto a la profundidad (z)

T_{env} = Temperatura ambiente

La distribución del flujo de calor dada la distribución Gaussiana viene dada por la siguiente ecuación:²

$$q(x, y, z, t) = \frac{3Q\eta}{\pi r^2} \exp \left\{ \frac{-3x^2}{r^2} \right\} \exp \left\{ \frac{-3z}{r^2} \right\} \quad (3)$$

Donde: Q energía de entrada
 η = absortividad del material.

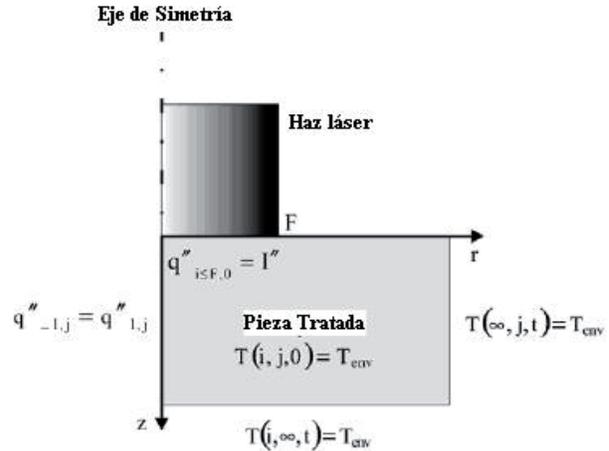


Fig.2. Representación esquemática de las condiciones de contorno.

r = Radio característico de la distribución del flujo de calor (cm)

ζ = coordenada de transformación que relaciona al sistema de coordenadas fijo y móvil $\zeta = z + v(\tau - t)$.

v = velocidad del haz láser en cm/s.

x = distancia desde el centro de la fuente de calor sobre la superficie tratada en esta sección transversal.

τ = tiempo de duración de cada semiciclo.

t = es el tiempo después que el centro de la fuente de calor pasa sobre la sección transversal.

El patrón de flujo de calor que resulta del movimiento del calor es tridimensional; existen gradientes de temperaturas a través del espesor del tratamiento, así como en las direcciones paralelas y transversales a la dirección del tratamiento; sin embargo este flujo patrón de calor es un tanto simplificado y se le puede considerar bidimensional cuando:

1. La energía de la fuente de calor del tratamiento es aplicada en cantidad uniforme.
2. La fuente de calor se está moviendo a una velocidad constante en camino de línea recta relativa a la línea de trabajo.
3. La sección transversal del tratamiento es constante.
4. Los efectos finales resultantes del inicio y finalización son despreciados.

Con la ecuación Gaussiana, se determinan los valores del flujo de calor en correspondencia con

el tiempo, que servirán para aplicar el flujo de calor sobre la pieza de trabajo.

La matriz de elementos finitos que gobierna la transferencia de calor (módulo HSTAR del paquete profesional COSMOS/M) se muestra en la siguiente ecuación:

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\} + \left([K_{cond}] + [K_{conv}] + [K_{rad}] \right) \{T\} = \{f_q\} + \{f_c\} + \{f_r\} + \{f_h\} \quad (4)$$

Donde: $\{T\}$ = Vector de temperatura

$\{\dot{T}\}$ = Razón de tiempo de cambio del vector de temperatura

$[C]$ = Matriz de capacitancia de calor

$[K_{cond}]$ = Matriz de conducción

$[K_{conv}]$ = Matriz de convección

$[K_{rad}]$ = Matriz de radiación

$\{f_q\}$ = Vector de carga de generación de calor

$\{f_c\}$ = Vector de carga de convección

$\{f_r\}$ = Vector de carga de radiación

$\{f_h\}$ = Vector de carga de flujo de calor.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos mediante la modelación y los resultados experimentales, se muestran en la tabla IV.

Como forma de evaluar la capacidad del modelo simulado por el método de los elementos finitos (MEF) del temple superficial con láser (TSL), de predecir la profundidad de penetración del

Tabla IV. Resultados de la profundidad endurecida experimental (PEE) y profundidad endurecida modelada (PEM).

Caso	Potencia (W)	Diámetro (mm)	Velocidad (mm/s)	PEE (mm)	PEM (mm)
1	60	0.6	1.0	0.11	0.1
2	100	0.6	1.0	0.26	0.25
3	60	1.6	1.0	0.02	0
4	100	1.6	1.0	0.07	0.11
5	60	0.6	1.5	0.07	0.03
6	100	0.6	1.5	0.19	0.21
7	60	1.6	1.5	0.02	0
8	100	1.6	1.5	0.04	0.05
9	80	1.1	1.25	0.06	0.06

endurecimiento conforme a la conocida correlación de Steen: $PE = P / \sqrt{DV}$, corroborada por Sagaró y Ceballos.³

$$PE = 0.00282608 \left(P / \sqrt{D*V} \right) - 0.11806 \quad (5)$$

Se procedió utilizando los valores calculados por el modelo a establecer una regresión múltiple según la expresión anterior.

$$PE = 0.00287395 \left(P / \sqrt{D*V} \right) - 0.118419 \quad (6)$$

El resultado permitió establecer que el modelo es capaz de predecir en un 96.3 % esta dependencia contra un 72.8%⁴ del modelo de regresión múltiple establecido sobre la base de los resultados experimentales, cuya menor precisión puede estar relacionada en la estimación incorrecta de la profundidad del endurecimiento (PE) de los casos 3 y 7.

La influencia de las variables tanto para el ensayo experimental como el estimado por el modelo se puede resumir como sigue. La velocidad de barrido (V), al mantenerse la potencia (P) y el diámetro (D) del haz constantes, influye en la profundidad endurecida de forma negativa, o sea, al aumentar la velocidad disminuye la profundidad del endurecimiento, lo cual es debido a que también disminuye el tiempo de interacción y no se logra un gradiente térmico suficiente para que el calor fluya hacia el interior. Sucede de manera análoga con el diámetro del haz, al aumentar éste disminuye la profundidad endurecida como resultado de una disminución de la densidad de potencia. La potencia sin embargo tiene un efecto contrario, ya que al aumentar ésta, aumenta la densidad de potencia en la superficie, y así aumentará hasta la temperatura de fusión, aspecto indeseable en este trabajo.

En la figura 3 se muestra la etapa de calentamiento de algunas de las combinaciones de acuerdo a la modelación matemática realizada, en donde aunque se aprecia el rápido incremento de la temperatura, se puede notar la influencia de la densidad de potencia absorbida por el material en el calentamiento de la superficie de forma directamente proporcional; o sea el aumento de la potencia incrementa la temperatura en la superficie debido a que se concentra el calor en un determinado volumen, en tanto al aumentar el diámetro del haz se ve el descenso de la temperatura, por ejemplo el caso 4 con respecto al caso 2, pues es

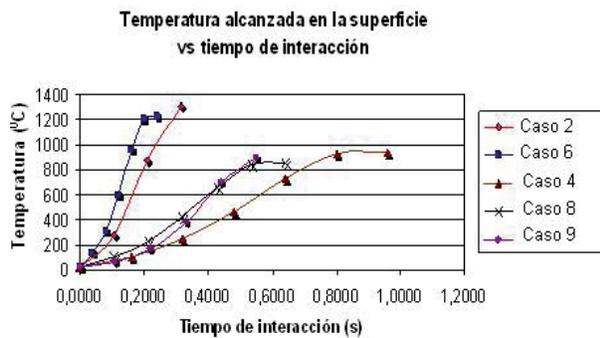


Fig. 3. Etapa de calentamiento para diferentes combinaciones de los parámetros operacionales del láser.

menor la cantidad de calor aportada a la superficie. Al aumentar la velocidad, disminuye el tiempo de interacción del haz con el material, con ello disminuye la temperatura en la superficie, con lo que también es menor la posibilidad de penetración.

En la figura 4 se muestra la temperatura alcanzada en la superficie y su comportamiento a medida que penetra en el material, comprobándose la influencia de las diferentes variables en la temperatura alcanzada a diferentes distancias de la superficie (profundidad de penetración), destacando que para las profundidades con temperaturas superiores a 770-790°C se pueden considerar como endurecidas. Los valores de dureza se determinarán en función de la rapidez de enfriamiento para cada profundidad. De la figura mencionada se pueden resaltar las siguientes observaciones:

1. La temperatura decrece desde la superficie hacia el interior de la probeta en todos los casos.
2. La temperatura en la superficie, al mantener la misma densidad de superficie y variar la velocidad de barrido disminuye así como en todo

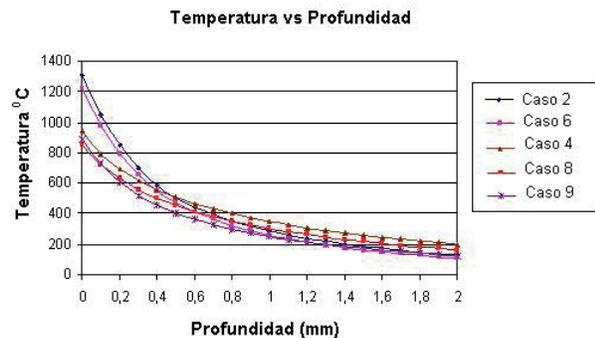


Fig. 4. Curvas de temperatura Vs. profundidad en el material.

el interior de la probeta, comparando el caso 6 con el 2.

3. Al disminuir la densidad de potencia que irradia a la superficie, manteniendo la potencia pero aumentando el diámetro del haz (casos 4 y 8), la temperatura de la superficie, y hacia el interior del material, desciende en comparación con los casos 2 y 6. Por otra parte, también es menor la profundidad endurecida, en el caso 4 $PE = 0.11$ mm, en tanto el caso 8 muestra una $PE = 0.04$ mm, esta disminución de la profundidad endurecida se debe al menor tiempo de interacción de este caso con respecto al número 4. En tanto para el caso 9 se puede comprobar una $PE = 0.06$ mm.

Analizados de diversas maneras los parámetros del láser y su influencia en el tratamiento térmico superficial, se puede concluir que la combinación óptima de parámetros para tener las mejores dimensiones de la ZAC es la condición de una potencia de 100 W, 0.6 mm y 1.0 mm/s, obtenidas tanto por los resultados obtenidos experimentalmente, como los obtenidos por la simulación.

Aún con las diferencias poco significativas entre los resultados se procedió a establecer una comparación de muestras (modelo y experimento) con el empleo del paquete Statgraphic 5.1 para establecer si las diferencias entre ambas muestras eran estadísticamente significativas mediante los criterios de asimetrías y curtosis tipificadas, prueba de Kolmogorov-Smirnov, análisis de las medias, medianas y desviaciones típicas. A manera de resumen se puede plantear:

- Ambos valores de asimetría estandarizadas están dentro del rango esperado.
- Ambos valores de curtosis estandarizadas están dentro del rango esperado.
- No existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95%.
- No existe diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones típicas de las dos muestras para un nivel de confianza del 95%.
- No existe diferencia estadísticamente significativa entre las medianas para un nivel de confianza del 95%.
- No existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones para un nivel de confianza del 95%.

Predicción de la influencia de los parámetros del tratamiento por láser en la microestructura del material

Uno de los principales aportes que realiza el temple superficial mediante láser es su rapidez, al aportar rápidamente una alta energía seguida de un enfriamiento a alta velocidad. Las transformaciones resultantes con el tratamiento láser requieren de tiempos de interacción de 0, 2 a 2 s.

El rango de enfriamiento mínimo para lograr un endurecimiento es de 1000 K/s (777°C/s).⁵ En los procesos modelados la rapidez de enfriamiento va desde 1463°C/s hasta 7500°C/s,^{5,6} cumpliéndose lo citado en diferentes trabajos, los altos valores de las velocidades de enfriamiento se deben a que el tamaño del haz en los tres niveles aplicados en el tratamiento son pequeños y que su relación con la velocidad de barrido del haz, $t = \frac{Dr}{v}$; o sea el tiempo de interacción entre el haz y la pieza, que varía desde 0, 4 a 1.6 s.

Las figuras 5 y 6 donde muestran que la rapidez de enfriamiento más alta se alcanza con la combinación de la figura 5 debido al menor tiempo de interacción con las probetas. Así como también se puede apreciar que a medida que aumenta la profundidad, disminuye tanto la temperatura alcanzada a esa profundidad como la rapidez de enfriamiento de la misma, lo cual trae como consecuencia modificaciones o diferencias microestructurales entre la superficie y la profundidad en cuestión.

Atendiendo a las temperaturas alcanzadas en el material calculadas con el modelo, las temperaturas en todos los casos alcanzaron la temperatura de

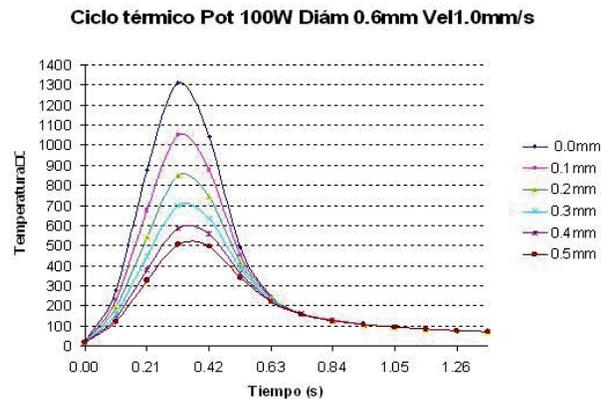


Fig. 5. Ciclo térmico para las condición de potencia 100 W, diámetro 0.6 mm, velocidad de barrido 1.0 mm/s.

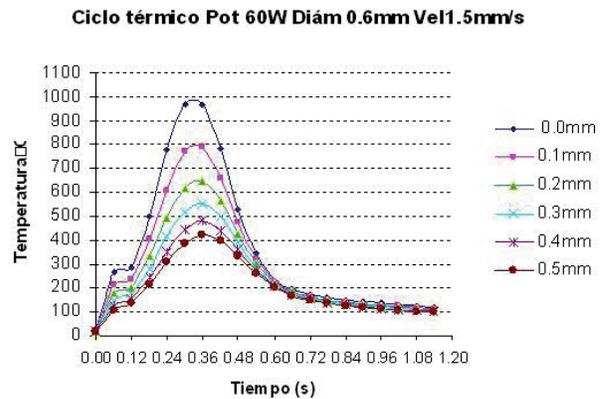


Fig. 6. Ciclo térmico para las condiciones de potencia 60 W, diámetro 0.6 mm, velocidad de barrido 1.0 mm/s.

transformación sin peligro de la fusión del material (aproximadamente 1500°C). Analizados los casos simulados se puede notar que en todos ellos el enfriamiento es muy superior al obtenido en los tratamientos térmicos convencionales de temple superficial, estando por tanto, en presencia de un tratamiento térmico atípico con condiciones muy diferentes en cuanto a la evolución microestructural, para cuya explicación no pueden emplearse los ciclos térmicos clásicos reportados para los tratamientos convencionales. Por ejemplo el bien conocido diagrama de las curvas TTT (temperatura, tiempo y transformación) para el temple convencional del acero W112⁷ refleja una temperatura de transformación para temple 770-790°C, atendiendo a su estructura inicial de perlita globular como resultado de un recocido de globalización.

Analizando la correspondencia entre los ciclos térmicos que aporta la modelación y los que aporta el diagrama TTT para el acero AISI W112. Se observa que en los casos simulados en el tratamiento láser, la rapidez de enfriamiento es tan grande que de acuerdo al diagrama mostrado anteriormente las curvas de la rapidez de enfriamiento no se interceptarán con las curvas de transformaciones, por lo que se podría conjeturar sobre la obtención de una transformación martensítica al 100% en la zona afectada por el calor con características de agujas finas en la zona tratada.

Para el caso 2 la temperatura en la superficie es de 1312 °C, para la cual según lo reportado por la literatura^{7,8} existe líquido y austenita, es decir, puede comenzar a fundir el acero, aunque no en fusión total. Otros especialistas 9, 10,11 consideran que para los

aceros tratados con láser existen dos temperaturas principales 1300°C (un grano fino en el resultado del temple) y 1500°C en el caso de desear la fusión.

Para la combinación analizada se tiene que la dureza en la superficie fue 1379 HV prediciéndose un 100% de martensita, lo que coincide con lo reportado en las corridas experimentales durante la observación microestructural.^{3,10, 12}

Para una profundidad de 0.1 mm se tiene aún 100 % de martensita con 1046 HV, a 0.2 mm de profundidad, el material posee una temperatura de 850.9°C y de acuerdo las transformaciones que tienen lugar se observa una zona de transición que presenta alrededor de un 96 % de martensita y 4% de cementita secundaria y una dureza de 930 HV. A partir de dicha profundidad comienza a variar la composición hasta la profundidad de 0.25 mm donde existe una temperatura de 773°C, o sea, en el rango recomendable para el temple en el caso del AISI W112 presentándose una concentración de 93 % de martensita y 7% de cementita secundaria. A partir de una profundidad de 0.3 mm no se transforma la estructura original del material (perlita globular).

En la figura 7 se observa la zona afectada por el calor obtenida mediante la simulación y por los experimentos reales respectivamente, para las condiciones de 100 W de potencia, diámetro del haz de 0.6 mm y velocidad de 1.0 mm/s donde podrá percibirse la proximidad de ambas ZAC. Se puede apreciar la correspondencia entre las dimensiones de las profundidades endurecidas para la ZAC modelada y la experimental.

Como otro ejemplo válido se analiza la combinación que corresponde al caso 6, o sea, manteniendo la misma densidad de potencia pero aumentando la velocidad de barrido. Aquí se alcanzan menores temperaturas y por ende menor profundidad de endurecimiento. Por ejemplo en la superficie se obtuvo en la modelación 1221.8°C, lo que permite estimar un 100% de martensita y una dureza de 1300 HV. Para una profundidad de 0.1 mm la ZAC presenta una temperatura de 982°C, pronosticándose la presencia un 100% de martensita con una dureza de 865 HV. A profundidad de 0.2 mm la temperatura es de 794°C, previéndose un 94% de martensita y 6% de cementita secundaria, lo que muestra el comienzo de la transición hasta

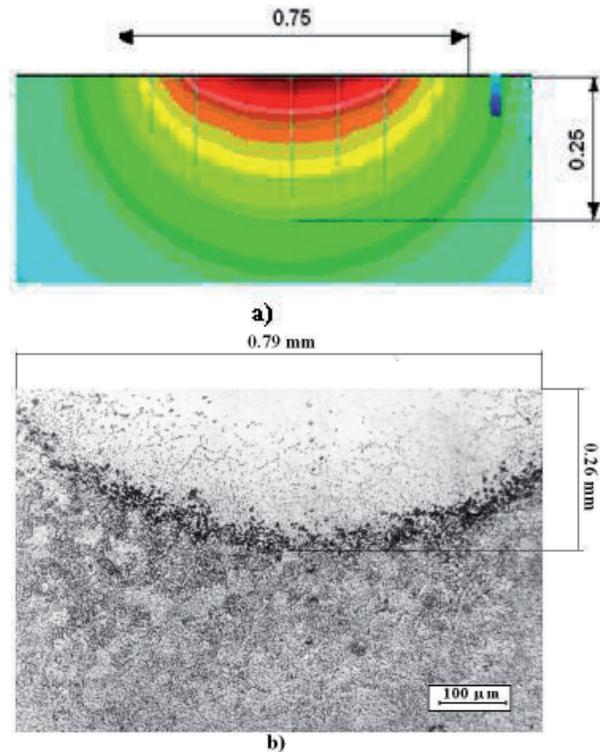


Fig. 7. a) Zona afectada por el calor obtenida por la simulación para las condiciones de 100 W de potencia, diámetro del haz de 0.6 mm y velocidad de 1.0 mm/s; b) Zona tratada obtenida en los experimentos para las mismas condiciones.

la estructura original. De igual forma se puede apreciar que la profundidad endurecida resultado de la modelación es bastante cercana a la experimental (0.21 mm la primera por 0.19 mm la segunda).

Al disminuir la densidad de potencia, sea aumentando el tamaño del haz o disminuyendo la potencia del mismo, disminuye la profundidad de la penetración del endurecimiento (por ejemplo caso 4). En este la superficie llega a alcanzar una temperatura de 941.8°C, lo que permite vaticinar un 100% de martensita y una dureza experimental de 851 HV. Seguidamente a una profundidad de 0.11 mm de la superficie según resultado de la modelación se puede augurar un 94% de martensita.

De manera general, analizando los resultados de la modelación y la experimentación se puede concluir que el tamaño de la zona afectada térmicamente durante el temple por láser depende de la densidad de potencia y el tiempo de interacción entre el haz y la pieza. Se llegan a alcanzar durezas por encima de 1000 HV en la superficie y en algunos casos hasta

la profundidad de 0.1 mm, para los casos de mayor densidad de potencia y mayor tiempo de interacción, destacándose en este caso la combinación de 100 W de potencia, 0.6 mm de diámetro y velocidad de 1.0 mm/s que presenta una dureza de 1046 HV hasta una profundidad de 0.18 mm (180 micras). La figura 8 muestra los perfiles de microdureza y profundidad de la capa endurecida para cada uno de los casos comentados.

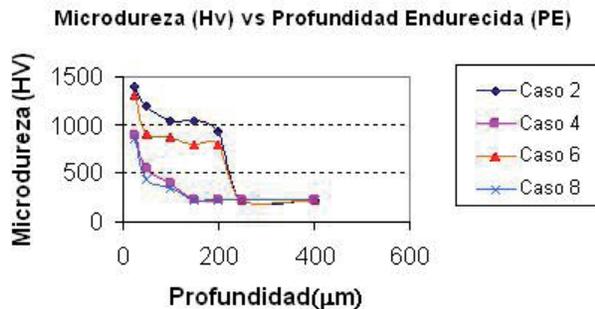


Fig.8. Perfiles de microdureza vs. profundidad endurecida para las muestras con tratamiento superficial con láser.

La dureza en la superficie en los experimentos se comporta (1379-850.2 HV), resultado de una transformación del material alcanzado un 100 % de martensita en la superficie para los casos 1, 2, 4, y 6, mientras que a mayor profundidad va disminuyendo y la cementita secundaria aumenta (zona de transición) hasta llegar a la profundidad en que el calor que afecta al material producto del haz láser no produce una temperatura mayor que la necesaria para la transformación, encontrándose la estructura original del material base de perlita globular.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo bidimensional, siendo las variables de entrada la potencia, el diámetro del haz, la velocidad del barrido del haz y las propiedades termofísicas del material dependientes de la temperatura, y un flujo de calor que varía con respecto al tiempo al interactuar con un determinado plano de referencia llegando a predecir con precisión los resultados de dicho tratamiento. En el caso del acero AISI W112 se pudo predecir la obtención de martensita en la superficie hasta una determinada profundidad en dependencia de las condiciones del tratamiento, una zona de transición de martensita

más cementita secundaria y finalmente una zona no afectada por el calor donde se mantiene la estructura original de perlita globular.

La mejor condición de los tratamientos superficiales con láser evidenciada por la relación microdureza *Vs.* profundidad del endurecimiento fue la combinación de potencia de 100 W, diámetro de 0.6 mm y la velocidad de barrido de 1.0 mm/s, obteniéndose una profundidad endurecida de 0.25 mm y un ancho de 0.75 mm. En esta combinación se obtuvo una dureza por encima de 1000 HV hasta una profundidad de 0.18 mm y una microdureza de aproximadamente 400 HV hasta la profundidad de 0.25 mm en la zona de transición. En el resto del material se presenta la estructura original no afectada por el calor con una dureza de 224 HV.

REFERENCIAS

- Oñoro, J; Bermejo, R; Portolés, A; Gamboa, R.; Modelización de la energía absorbida en la fusión de un metal por un haz láser. Revista Metal Madrid, 34(5) (421-427), 1998.
- Sagaró, R. et al. Modelización del perfil de soldadura y de la cavidad de vapor en la aleación de aluminio 5182 soldada con láser. Revista Metalurgia, Madrid, 37 (2001), p 643-652.
- Sagaró, R; Ceballos, J. S; Blanco, A; Mascarell, J Tribological behaviour of line hardening of stell Y13A with Nd:YAG laser, Wear 225-229 (1999).
- Sagaró, R, Ceballos, J. Tratamiento superficial del acero AISI W1 mediante láser de Nd: YAG. Revista Metalurgia, Madrid, 34 (2), 1998.
- Ruiz, J; Fernández, B.J; Belló, J. M^a; Sanz, P; Zubiri, J.F; Predicción del efecto del temple de aceros con láser. Revista Metalurgia Madrid p: 374-385. 1990
- Maco Robles, Anabel; Modificación superficial mediante láser de fundiciones grises con el objetivo de mejorar su resistencia al desgaste. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Abril 1997.
- Rapatz, F. Roll, F.Diccionario enciclopédico técnico materiales siderúrgicos Editorial Científico-Técnica, 1974.

8. Guliaev A.P. Metalografía 2T. Editorial MIR. Moscú, 1983
9. Cheung, Noé; Pinto, Maria Aparecida; Filippini Ierardi, Maria Clara; Garcia, Amauri Mathematical Modeling and Experimental Analysis of the Hardened Zone in Laser Treatment of a 1045 AISI Steel, *Materials Research*, Vol. 7, No. 2, 349-354, 2004.
10. Amado, J. M; Álvarez, C; Nicolás, G, López, A. J, Pérez, J. A, Ramil, A. Saavedra, E; Santiesteban, J; Tobar, M.J; Yánez. A; Modelización de las transformaciones de fase en el proceso de endurecimiento de aceros con láser de CO₂. IX Congreso de Ciencia y Tecnología de Materiales, Madrid. Ref.:057/CTM2003.
11. Sagaró, R., Ceballos, J.S. Endurecimiento superficial de aceros y fundiciones mediante láser de Nd: YAG. *Revista Metalurgia*, Madrid, 37 (2001), p 607-615.
12. Amado, J. M. Optimización de parámetros en procesos de tratamiento térmico superficial de materiales con láser. *Memorias del II Congreso Ibérico de Tribología*, 2003. ISBN: 84-9705-494-6.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



CENTRO DE INNOVACIÓN, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Dentro del marco del primer aniversario del Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología, la Universidad Autónoma de Nuevo León tiene el honor de invitarlo al:

Simposio sobre Investigación Científica e Innovación Tecnológica 2009

Reunión Internacional de Nanociencias
Monterrey. 19-22 Mayo 2009

Objetivo:

Debatir sobre los medios innovadores emergentes para impulsar la competitividad en los diferentes sectores de la sociedad

Paneles de discusión - Conferencias magistrales - Mesas redondas - Talleres especializados - Expo - industrial - Poster

Sede: CIIDIT - UANL

Km. 10 de carretera al Aeropuerto Internacional de Monterrey, Apodaca, Nuevo León, México



Informes:

www.ciidit.uanl.mx
rogelio.garza@uanl.mx
Tel. (81) 1340 4000 Ext.. 1500
Srita. Claudia Blanco Villalobos