

Análisis de la influencia del factor de solapamiento en el tratamiento térmico de superficies extensas de aceros por láser(·)

A. García-Beltrán*, L.F. Marín** y J.L. Ocaña**, ***

Resumen

Sobre la base de modelos numéricos, desarrollados por los autores para el análisis predictivo de procesos de tratamiento térmico superficial de aceros por láser, se analiza, desde un punto de vista computacional, la influencia del factor de solapamiento en el tratamiento de superficies extensas de dichos materiales mediante ciclos parcialmente superpuestos de irradiación láser. En dichos análisis, se tienen en cuenta, explícitamente, las propiedades termofísicas de los materiales considerados así como su dependencia térmica, estableciéndose, finalmente, diversos criterios de optimización de las variables de irradiación (incluyendo posibles variaciones en la distribución espacial de la energía del haz láser) con el objeto de maximizar, de forma combinada, la profundidad de material transformado y el nivel de dureza alcanzado, evitando, al mismo tiempo, el sometimiento del material a ciclos térmicos degradatorios del tratamiento original, en concreto, el revenido superficial.

Palabras clave

Láser. Tratamiento superficial. Temple. Acero. Simulación numérica.

Analysis of the influence of the overlapping factor in the laser transformation hardening of extended surfaces of steel

Abstract

On the basis of numerical models developed by the authors for the predictive analysis of transformation hardening of extended steel surfaces, the difficulties existing for the treatment of extended surfaces by overlapping cycles of laser heating are analyzed from a computational point of view. In this analysis, thermal and physical properties of the material are considered along with their temperature dependence. Some optimization guidelines for the irradiation parameters (including modifications of the spatial distribution of the laser beam energy) are determined in order to obtain both the adequate material transformed depth and the required hardness profiles.

Keywords

Laser. Surface treatment. Transformation hardening. Steel. Numerical simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La modelización numérica de procesos de tratamiento térmico superficial de materiales con láser y, en particular, de aceros, ha sido objeto de investigación y publicación previa de los autores^[1]. La herramienta numérica desarrollada y utilizada en dichos trabajos constituye un elemento fundamental de diseño de los procesos de temple con láser, que es capaz, en la práctica, de orientar de forma decisiva el diseño operativo de los mismos, minimizando la experimentación de prueba y error. Aunque, desde hace tiempo,

otros muchos autores han analizado diversos factores del proceso, la incorporación efectiva del láser a la realización de procesos de temple como tecnología sustitutiva de otras en uso, exige el dominio de su aplicación sobre superficies extensas, que son, en definitiva, las constitutivas de las piezas reales. Rappaz^[2] realiza un estudio general sobre las ecuaciones de partida y los distintos métodos, especialmente numéricos, utilizados para su resolución. Para Ion^[3], la elección de un tipo de modelo depende de las necesidades de predicción y de los recursos disponibles. Los modelos analíticos se emplean en los casos más

(·) Trabajo recibido el día 9 de mayo de 2006 y aceptado en su forma final el día 15 de noviembre de 2006.

* Departamento de Automática, Ing. Electrónica e Informática Industrial, ETSI Industriales – UPM. C/José Gutiérrez Abascal, 2. E-28006 MADRID.

** Departamento de Física Aplicada. ETSI Industriales – UPM, C/José Gutiérrez Abascal, 2. E-28006 MADRID

*** Centro Láser UPM. Ctra. de Valencia, km. 7,300. E-28031 MADRID.

sencillos y son más rápidos en proporcionar soluciones para las distribuciones de temperaturas, pero deben asumir hipótesis de trabajo simplificadas. En cambio, los modelos numéricos no tienen por qué observar tantas restricciones y pueden tratar cualquier geometría en el material o distribución transversal de intensidad incidente del haz, si bien necesitan un gran esfuerzo computacional. Ruiz y otros^[4 y 5] desarrollan un modelo que toma una distribución de intensidad rectangular o cuadrada uniforme y propiedades termofísicas y ópticas del material constantes. Galantucci y Tricarico^[6] proponen dos modelos de elementos finitos para procesos estacionarios y transitorios, respectivamente, basados en el código comercial ANSYS y teniendo en cuenta datos experimentales obtenidos en el tratamiento térmico de una guía prismática de perfil en L. Gutierrez y Jen^[7] estudian, mediante simulaciones numéricas, los efectos de la variación de las propiedades térmicas de los materiales con la temperatura en la distribución térmica generada por una fuente láser. Amado *et al.*^[8] analizan numéricamente las transformaciones de fase en el proceso de endurecimiento de aceros con láser de CO₂, empleando un modo de distribución de intensidad TEM_{01*}. Rowshan y Baán^[9] utilizan el código SYSWELD FEM para investigar el efecto del solapamiento en el temple de un acero C45 con un haz láser de distribución de intensidad uniforme. Álvarez *et al.*^[10] emplean el código ANSYS junto con algunos datos experimentales para el control en tiempo real y monitorización del temple de piezas cilíndricas de aceros con láser. En general, los autores que emplean este tipo de modelos analizan el efecto de la variación de alguno o algunos de los parámetros de los procesos de tratamiento térmico superficial con láser, fundamentalmente, la potencia y velocidad del haz, la distribución de intensidad o las propiedades termofísicas de los materiales.

La principal novedad de este trabajo se centra en la aplicación de un modelo numérico para el análisis de la influencia del factor de solapamiento, empleando diversas distribuciones transversales de intensidad y del número de pasadas durante el tratamiento térmico de superficies extensas de aceros por láser.

En el tratamiento superficial de materiales con láser se define una superficie extensa como aquella cuya dimensión no puede ser totalmente cubierta por una sola pasada del haz láser. En el caso de geometría plana, esto obliga a aplicar varias pasadas paralelas consecutivas. El número de pasadas estará relacionado con la anchura total a tratar, el tamaño del haz y el solapamiento entre dos pasadas consecutivas.

Los puntos que no son de solape recibirán incidencia directa del haz en una sola pasada pero serán afectados por la transferencia de calor por conducción

desde las zonas adyacentes irradiadas por pasadas del haz, anteriores o posteriores. Los puntos de solape, además, reciben incidencia directa en dos pasadas. Todo ello se refleja en sus ciclos o historias térmicas lo que, dependiendo de las características del acero empleado, puede tener consecuencias negativas de cara al temple, como temple incompleto, fusión local o revenido incontrolado.

Desde el punto de vista de la modelización numérica, se considera que un tratamiento de temple es correcto cuando se ha obtenido fase martensítica a una profundidad suficiente, prácticamente en toda la dimensión tratada, sin haber provocado fusión en ningún punto de la superficie. Para conseguirlo hay que evitar los efectos negativos mencionados, seleccionando cuidadosamente para cada distribución transversal de intensidad los valores de anchura del haz, número de pasadas, anchura de solape y potencia aplicada.

La estrategia de superposición parcial de pistas de irradiación del objeto, de lograr el temple en la profundidad requerida de zonas extensas de material, será un elemento fundamental de diseño del proceso. Dicha estrategia se debe establecer en función de la distribución espacial de la energía del haz láser aplicado y del resto de parámetros que determinan la fuente efectiva de energía aplicada al material objeto del tratamiento y, consecuentemente, la profundidad y extensión de la zona templada y la zona afectada térmicamente en cada recorrido del haz.

2. TEORÍA BÁSICA

Para poder analizar numéricamente estos procesos, se ha modificado el módulo de especificación de condiciones de contorno del código TEMPLUM^[11 y 12], que resuelve la ecuación de transmisión del calor en un sólido mediante el método de los elementos finitos y que ha sido aplicado anteriormente con gran éxito en la simulación de tratamientos superficiales de materiales de diferente naturaleza con láser^[13-15].

Al igual que en el caso de tratamientos térmicos superficiales realizados en pasada única, el problema físico a resolver es el de la transmisión de calor por conducción en un sólido con fuente térmica superficial. En geometrías cartesianas rectangulares, la ecuación del calor se formula:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\bar{k} \nabla T) = E(\vec{r}, t) \quad (1)$$

es decir, desarrollando:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left(k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A(x, y, z, t) \quad (2)$$

Para su resolución con las adecuadas condiciones de contorno, TEMPLUM emplea el método de los elementos finitos con un esquema de Crank-Nicholson semi-implícito para la variable temporal y toma en consideración la variación con la temperatura de las propiedades termofísicas del material (capacidad calorífica a presión constante y conductividad térmica) y de la absorptancia de su superficie. En la figura 1 se muestra la variación con la temperatura de dichas propiedades, correspondientes al acero 36NiCrMo16. Debido a que la densidad, ρ , que también depende de la temperatura, aparece en las ecuaciones multiplicando a la capacidad calorífica, ρC_p , se ha tomado su producto, a efectos del código, como único término independiente de la temperatura. En el conjunto de datos de entrada, la densidad se considera constante, siendo la capacidad calorífica la que varía con la temperatura. La variación abrupta de la capacidad calorífica con la temperatura alrededor de 700 °C se debe, precisamente, a los efectos de las transformaciones internas del acero (Curie más austenización)^[16].

A los efectos prácticos de la simulación, se considerará la aplicación de un láser de CO₂ con una longitud de onda de 10,6 μm (radiación infrarroja) y con una penetración de unas pocas decenas de nanómetros en el acero. Los cálculos, tanto teóricos como experimentales^[17-19], muestran que la radiación infrarroja en un metal no pasa de esta profundidad por lo que la deposición de la energía se lleva a cabo, esencialmente, en la superficie del material. Esta penetración de la radiación láser es, en todo caso, despreciable frente a la profundidad de la probeta, lo que justifica la consideración de fuente superficial en el modelo numérico empleado^[16].

Asimismo, desde el punto de vista de la modelización el objetivo del proceso es la transformación de la microestructura de la superficie de la pieza mediante el correspondiente ciclo térmico de temple, de forma que la evaluación de la historia térmica de los puntos de la probeta indique claramente la extensión de las zonas transformadas.

Para que el acero temple se consideran necesarios enfriamientos del orden de 10² K/s desde la zona austenítica: la fuente láser proporciona el calentamiento por encima de la temperatura de austenización, mientras que el enfriamiento se produce por

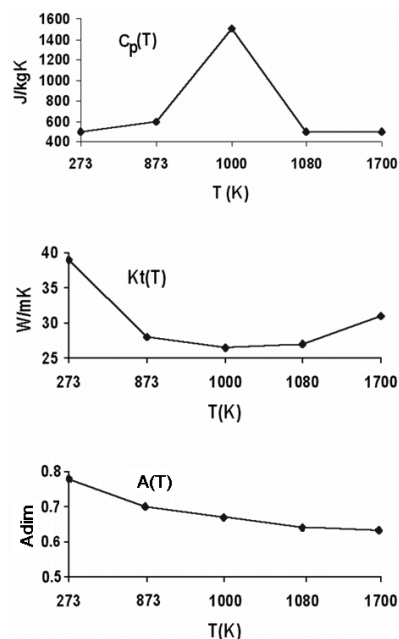


Figura 1. Capacidad calorífica, conductividad térmica y absorptancia de la superficie del material en función de la temperatura.

Figure 1. Temperature dependence of material properties: heat capacity, thermal conductivity and absorptivity.

conducción de calor desde la zona localmente irradiada hacia el resto de la pieza.

Todas las simulaciones se realizan sobre probetas ortoédricas de acero 36NiCrMo16, siguiendo el esquema de la figura 2.

Para la realización del tratamiento sobre zonas extensas, el haz láser considerado se aplica centrado y desplazándose el haz en la dirección OX. Una vez que

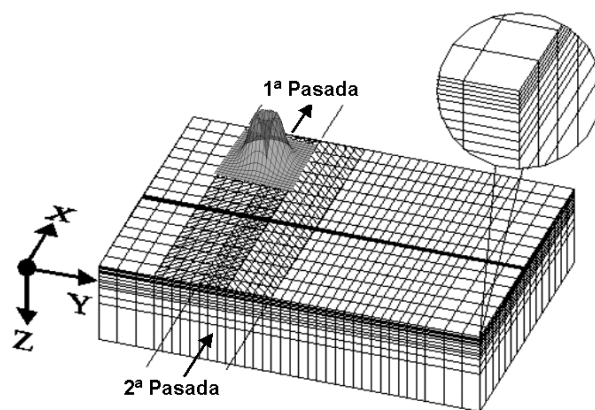


Figura 2. Esquema de tratamiento de varias pasadas solapadas sobre probeta discretizada.

Figure 2. Scheme of a two-laps treatment with overlapping on the discretised test piece.

se completa una pasada, se simula su reposicionamiento mediante un retroceso y avance según el eje OY del cabezal en vacío, para atacar la pieza en una nueva pasada activa con un posible solapamiento sobre la anterior, repitiéndose el proceso tantas veces como sea necesario para cubrir toda la anchura a tratar.

En el caso de distribución de intensidad no uniforme, se emplea una probeta de dimensiones $28 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$ con un mallado relativamente fino para obtener un grado de resolución adecuado en la discretización del haz que permita distinguir suficientemente entre las diferentes distribuciones de intensidad consideradas: además de la distribución de intensidad homogénea, se consideran las distribuciones de intensidad representadas por los modos TEM_{00} , TEM_{01^*} y TEM_{02^*} .

Para distribución homogénea no existe este problema de resolución espacial y con un mallado menos fino para la probeta se obtiene una buena relación entre la precisión de los resultados obtenidos y el tiempo de cálculo. El paso temporal entre iteraciones permanece constante en cada simulación: es un parámetro importante que influye tanto en la calidad de los resultados como en el tiempo de cálculo y se le han dado valores entre 0,02 y 0,04 s. En las simulaciones se fija el diámetro del haz en 8 mm (según el criterio de que la intensidad del haz haya disminuido respecto a su valor en el eje en un factor e^2) y la velocidad relativa en 10 mm/s. Para que los resultados obtenidos con distintas distribuciones de intensidad (modos TEM_{00} , TEM_{01^*} y TEM_{02^*}) sean comparables entre sí se ha fijado la potencia de pico para el modo TEM_{00} en 800 W y se ha impuesto la igualdad de intensidad media entre los tres casos, obteniendo los valores de pico correspondientes para las otras dos distribuciones.

En la tabla I se recoge una relación de los casos analizados con distribución uniforme de intensidad. En todos ellos, se aplica una potencia constante de 800 W, excepto en las dos simulaciones (casos 4 y 5) de nueve

Tabla I. Simulaciones llevadas a cabo para distribución de intensidad uniforme

Table I. Simulations carried out considering uniform distribution

Caso	Número de pasadas	Solape	Duración del tratamiento(s)	Anchura total tratada (mm)
1	3	0%	11.4	24
2	3	25%	11.4	20
3	3	50%	11.4	16
4	9	30%	33.4	53
5	9	30%	33.4	53

pasadas. En el caso 4, se toma una potencia, también constante pero más elevada (1.000 W), para forzar la aparición de zonas fundidas en la superficie de la pieza. En el caso 5, de idéntica configuración geométrica que el anterior, la potencia varía linealmente a lo largo del tratamiento (rampa de potencia) desde 1.000 W hasta 500 W, buscando evitar la fusión local, pero sin dejar de alcanzar la temperatura de austenización.

La tabla II muestra las simulaciones realizadas con distribución no uniforme según los modos TEM_{00} , TEM_{01^*} y TEM_{02^*} , en tres pasadas paralelas.

A modo de ejemplo, la figura 3 muestra el esquema de modelización de la incidencia de un haz con distribución de intensidad según un modo TEM_{01^*} sobre la superficie de la probeta (a) y la curva temporal

Tabla II. Simulaciones llevadas a cabo para distribuciones de intensidad no uniforme

Table II. Simulations carried out considering non-uniform distributions

Caso	Modo	Solape	Potencia de pico (W)	Anchura total tratada (mm)
6	01*	40%	936	17.6
7	01*	20%	936	20.8
8	02*	40%	923	17.6
9	02*	20%	923	20.8
10	00	40%	800	17.6
11	00	20%	800	20.8

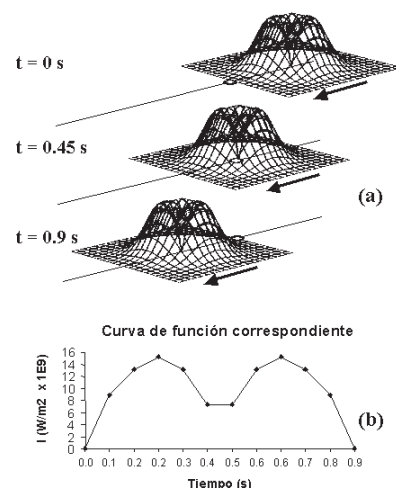


Figura 3. Esquema de la modelización de la incidencia de un haz con distribución de intensidad TEM_{01^*} (a) y curva temporal de intensidad correspondiente sobre un punto de la superficie (b).

Figure 3. Modelization scheme of the laser beam incidence with a TEM_{01^} distribution (a) and corresponding intensity function of a surface node (b).*

de intensidad correspondiente sobre un punto de la superficie (b).

En general, los resultados y correspondientes gráficas que se obtienen representan el ciclo térmico o variación de la temperatura a lo largo del tratamiento para puntos de la superficie de la probeta contenidos en la línea perpendicular a la dirección del haz, 'línea de selección de nodos', aunque TEMPLUM también permite generar mapas de isotermas para el instante final del tratamiento en cualquier plano paralelo a los planos XY, XZ e YZ.

En todos los casos, las caras de la pieza que no reciben incidencia directa del láser se consideran adiabáticas, no teniéndose en cuenta las pérdidas por convección ni radiación en la superficie superior. Estudios realizados por varios autores^[2 y 3] consideran estas posibles pérdidas despreciables.

3. RESULTADOS

Con las simulaciones anteriores se estudia la influencia sobre los resultados del temple de la variación de la anchura de solapamiento, del número de pasadas y de la relación entre la anchura de solapamiento y la distribución transversal de intensidad del haz. En cada uno de los apartados siguientes se muestran y comentan gráficos de los ciclos térmicos obtenidos, acompañados de cuadros explicativos y esquemas de la situación de los puntos dentro de la línea de selección de nodos.

3.1. Efecto de la variación de la anchura de solape (distribución uniforme)

En la figura 4 se presentan cortes según el plano transversal al del movimiento del haz, pasando por la línea de selección de nodos, representando las bandas de

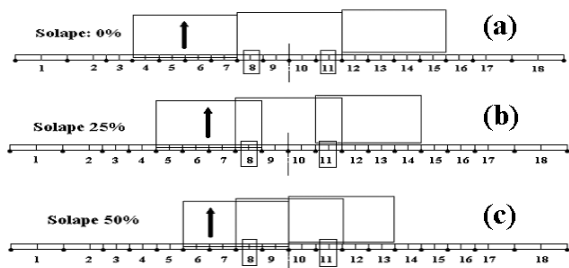


Figura 4. Esquema de tratamiento de varias pasadas con distintos solapes sobre probeta discretizada.

Figure 4. Scheme of a several-laps treatment with different overlapping on the discretised test piece.

pasada del haz sobre los nodos 8 y 11 para distintos valores de solape: 0 % (a), 25 % (b) y 50 % (c), respecto al tamaño del haz. En la figura 5 se recogen los ciclos térmicos correspondientes a dichos nodos. Cuando no existe solape sólo se analiza la segunda pasada y, la primera y la tercera tienen efecto, indirectamente, por conducción de calor.

Al aumentar el solape desde el 25 hasta el 50 %, a pesar de recibir la misma intensidad tanto en el nodo 8 como en el nodo 11, el calentamiento es mayor debido a que las condiciones de enfriamiento son más desfavorables.

Como muestra la figura 6, en el tercer caso, el nodo se encuentra con dos zonas adyacentes que reciben incidencia y que actúan como barreras adiabáticas que impiden el flujo de calor hacia los laterales, mientras que con el solape del 25 % puede enfriarse mejor, cediendo más calor hacia su izquierda.

Esto, no es totalmente equivalente al efecto de desplazarse transversalmente, en el mismo caso, a lo largo de una misma banda de incidencia porque las condiciones de enfriamiento no son las mismas. No obstante, los resultados son muy parecidos y, como muestra la figura 7 para el caso de 0 % de solape, los nodos afectados por la periferia del haz se calientan menos (una diferencia de temperatura entre 120 y 150°).

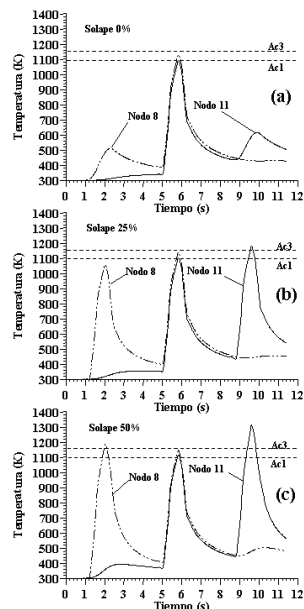


Figura 5. Ciclos térmicos de los nodos 8 y 11 a lo largo de las simulaciones con distribución uniforme a 800 W y velocidad relativa de 0,01 m/s.

Figure 5. Material thermal cycles at nodes 8 and 11 in simulations with uniform distribution at 800 W with a relative speed of 0.01 m/s.

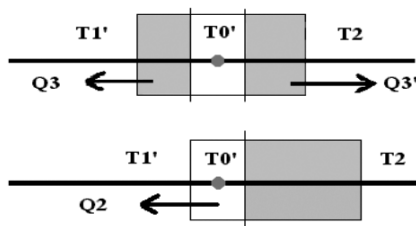


Figura 6. Condiciones de enfriamiento del nodo 11 cuando recibe incidencia en la tercera pasada con solape del 50 % (arriba) y del 25 % (abajo).

Figure 6. Quenching boundary conditions at node 11 receiving incidence in the third lap with an overlapping of 50 % (upper) and 25 % (lower).

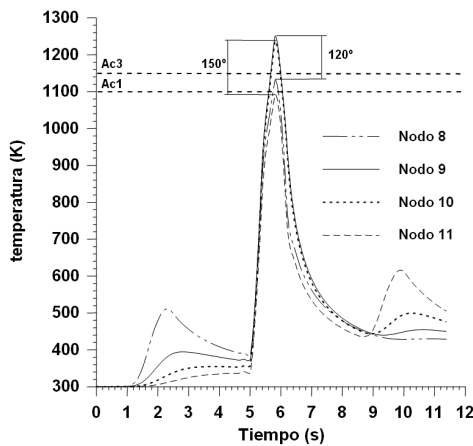


Figura 7. Ciclos térmicos de la simulación con 800 W y 0,01 m/s para nodos con la misma intensidad incidente (8-11).

Figure 7. Thermal cycles in simulation with 800 W and 0.01 m/s at nodes (8-11) with the same incidence.

3.2. Efecto de la variación del número de pasadas (distribución uniforme)

En la figura 4, el nodo 8, perteneciente a la banda de solape del 25 %, recibe la misma intensidad en la primera y en la segunda pasada pero su temperatura se incrementa más en esta última. Es lo que puede denominarse “efecto local de calentamiento de la probeta” y se debe a que, como muestra la figura 8, esa región se enfría cediendo calor por conducción (flujo Q_2) hacia una zona que ya ha sido previamente calentada, en lugar de hacerlo más eficazmente hacia la zona más fría de la probeta (flujo Q_1).

A medida que avanza el tratamiento crece la temperatura de base de la probeta por la difusión térmica desde la superficie. En las zonas de la probeta que se irradian al final del tratamiento, el correspondiente incremento de la temperatura se suma al efecto de

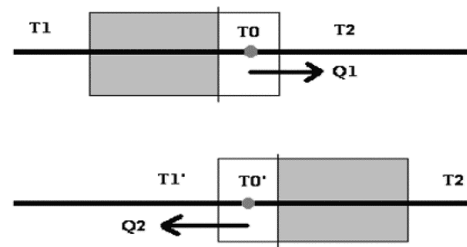


Figura 8. Condiciones de enfriamiento del nodo 11 con solape del 25 % en la segunda pasada (arriba) y en la tercera (abajo).

Figure 8. Quenching boundary conditions at node 11 with an overlapping of 25 % in the second (upper) and third laps (lower).

calentamiento local, dando lugar a una temperatura máxima de pico creciente con el tiempo, que puede llevar a fusión local. Esto se muestra en la figura 9, donde están representados los ciclos térmicos de varios nodos de la superficie de la probeta para un tratamiento de nueve pasadas con distribución uniforme de intensidad y potencia constante (1.000 W).

Obsérvese, además, que en las zonas irradiadas al principio del tratamiento la temperatura se mantiene en torno a 500 K después de sufrir sus correspondientes picos de temple, lo que deberá tenerse en cuenta en tratamientos suficientemente largos, si el material es sensible a revenidos bajos.

Si se repite la misma simulación variando linealmente la potencia de 1.000 a 500 W, se aplica a la probeta un 25 % menos de energía, lo que se traduce en una disminución, con el tiempo, de los picos de temperatura máxima, pero manteniéndose, siempre, por encima de la línea de austenización (Fig. 10).

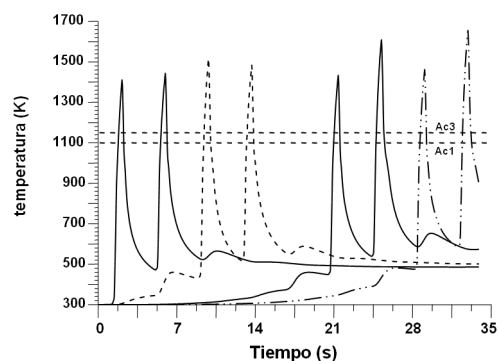


Figura 9. Ciclos térmicos de la simulación con potencia constante a 1.000 W en 9 pasadas, para los nodos de la superficie en la línea media de la probeta.

Figure 9. Material thermal cycles in simulation with constant power 1000 W and 9 laps at nodes on the surface of the test piece's midline.

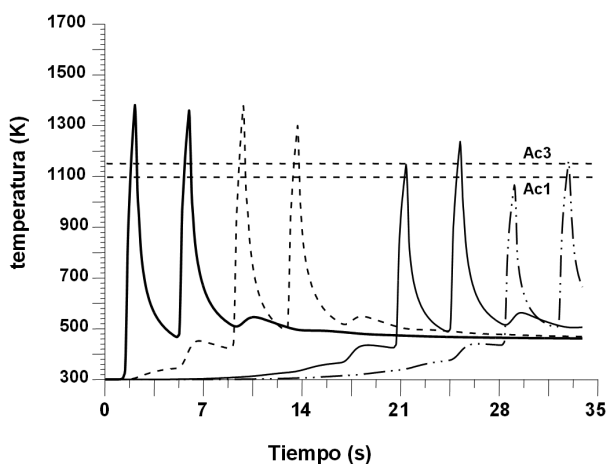


Figura 10. Ciclos térmicos de la simulación con 9 pasadas, potencia variando linealmente desde 1.000 W hasta 500 W a lo largo del tratamiento, para los nodos de la superficie en la línea media de la probeta.

Figure 10. Material thermal cycles in simulation with 9 laps, linear power variation from 1000 W to 500W during the process, at nodes on the surface of the test piece's midline.

3.3. Efecto de la relación entre el solape y la distribución de intensidad

En la figura 11 aparece un detalle de los ciclos térmicos de los nodos 11 (solape) y 13 (centro de la probeta) para los modos TEM₀₀, TEM_{01*} y TEM_{02*}, en la segunda pasada de un tratamiento de tres pasadas con un solape del 20 %. Se aprecian, claramente, los cambios de las formas de los ciclos térmicos del nodo central (nodo 13) al cambiar la distribución de intensidad. Sólo el modo TEM_{02*}, mucho más distribuido hacia la periferia del haz que los otros dos, llegaría a la zona austenítica en el nodo 11, perteneciente a la zona solapada, y templaría en su segunda pasada propia, que es donde se alcanza la mayor temperatura, por el efecto denominado “calentamiento local”.

La figura 12 recoge los esquemas de solapamiento de pasadas (20 % y 40 %) y selección de nodos asociados a los ciclos térmicos mostrados en las figuras 13 (TEM₀₀), 14 (TEM_{01*}) y 15 (TEM_{02*}). Puede observarse que, para el caso TEM₀₀, si se aumenta el solape al doble manteniendo la posición del nodo 11, nos encontramos con que templaría claramente en la primera pasada pero en la segunda entra en la franja de revenido, lo que podría deshacer los efectos del temple si el tiempo de permanencia es suficiente (figura 13). Para distribución TEM_{01*} sucede lo mismo, aunque la diferencia de temperatura entre picos consecutivos disminuye, como se aprecia en la figura 14. Compárese con la figura 15 que recoge el mismo caso pero con el

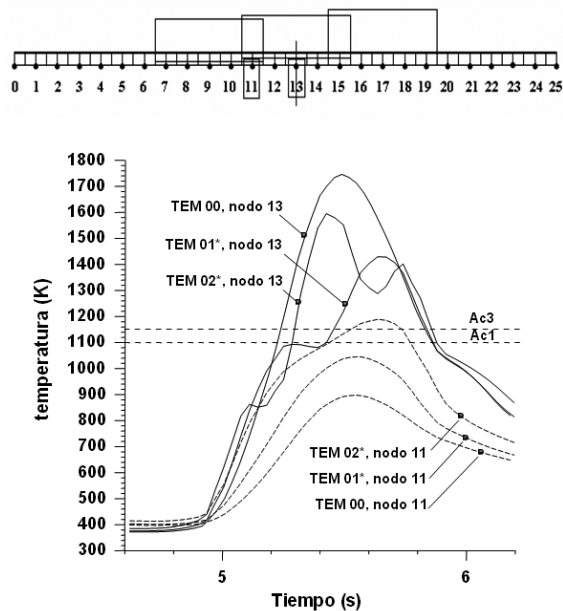


Figura 11. Esquema de pasadas y de ciclos térmicos de los nodos 11 y 13 en simulaciones con modos TEM₀₀, TEM_{01*} y TEM_{02*} a igualdad de intensidad media.

Figure 11. Scheme of lap bands and material thermal cycles at nodes 11 and 13 in simulations with distributions TEM₀₀, TEM_{01*} and TEM_{02*} with the same average intensity.

modo TEM_{02*}, donde el nodo 11, que ya templaba en su segunda pasada propia con solape del 20 %, sufre un doble temple al aumentar el solape al 40%.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los casos analizados se ha distinguido entre la posibilidad de que el solape sea pequeño o grande respecto a la anchura del haz, se ha estudiado el efecto del número de pasadas y se han combinado con los casos

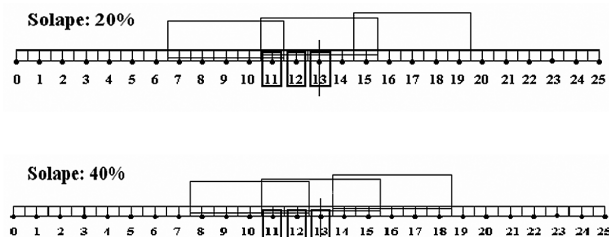


Figura 12. Esquema de la situación de los nodos y de las bandas de pasada del haz con distintos solapes para las simulaciones con modos TEM₀₀, TEM_{01*} y TEM_{02*}.

Figure 12. Scheme of nodes situation and lap bands with different overlapping in simulations with distributions TEM₀₀, TEM_{01*} and TEM_{02*}.

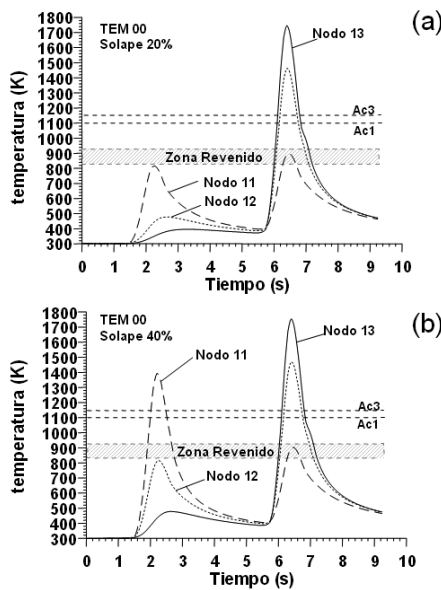


Figura 13. Ciclos térmicos de los nodos 11 y 13 (modo TEM_{00} a 800 W de potencia de pico y solapes del 20 % y 40 %).

Figure 13. Material thermal cycles for nodes 11 and 13 (TEM_{00} , 800 W peak power, overlapping 20 % and 40 %).

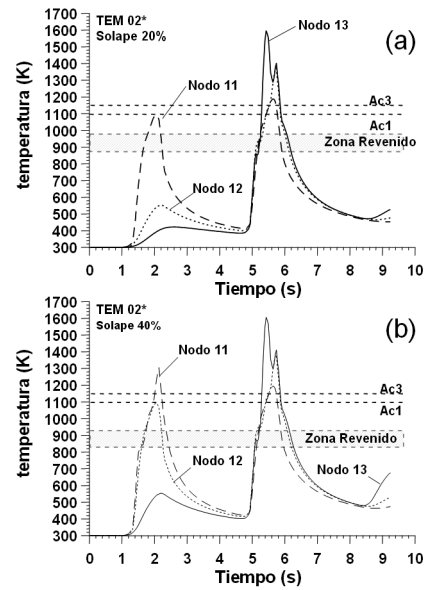


Figura 15. Ciclos térmicos de los nodos 11 y 13 (modo TEM_{02^*} a 923 W de potencia de pico y solapes del 20 % y 40 %).

Figure 15. Material thermal cycles for nodes 11 and 13 (TEM_{02^} , 923 W peak power, overlapping 20 % and 40 %).*

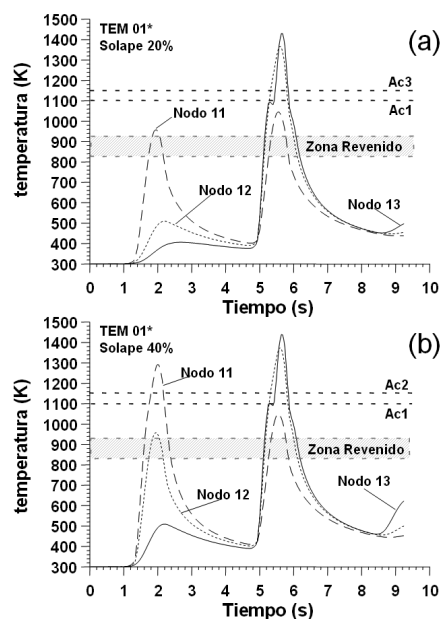


Figura 14. Ciclos térmicos de los nodos 11 y 13 (modo TEM_{01^*} a 923 W de potencia de pico y solapes del 20 % y 40 %).

Figure 14. Material thermal cycles for nodes 11 and 13 (TEM_{01^} , 923 W peak power, overlapping 20 % and 40 %).*

de distribución uniforme y no uniforme (TEM_{00} , TEM_{01^*} y TEM_{02^*}).

De los resultados expuestos en el apartado anterior se desprende que las zonas más sensibles de cara al

temple son las regiones que siendo de solape quedan en la periferia de su segunda pasada propia. En caso de no llegar a templar ni en la primera ni en la segunda pasada propia, en zonas de solape cuando éste es pequeño, se aconseja aumentar la potencia aplicada cuando la distribución es uniforme, mientras que en caso de distribución según TEM_{00} o TEM_{01^*} se recomienda pasar, siempre que sea posible, a una distribución más uniforme (como TEM_{02^*}) o bien, disminuir la velocidad relativa haz-probeta en lugar de practicar un incremento de potencia, que puede dar lugar a fusión local en los puntos de máxima potencia antes que solucionar el problema del temple. En el caso de distribución no uniforme, si aún con el modo TEM_{02^*} se presentan problemas de ausencia de temple, sería factible aplicar un aumento de potencia, pues a medida que la distribución es más homogénea son más válidas las pautas recomendadas para distribución uniforme. En este sentido los resultados obtenidos con el modo TEM_{02^*} tienden a comportarse como los obtenidos por una distribución uniforme.

Para la situación de zonas periféricas de solape cuando éste es grande, habiendo templado en su primera pasada propia pueden sufrir un revenido en la segunda. Este comportamiento es poco probable si el haz es uniforme, debido a que difícilmente la diferencia de temperatura entre dos picos consecutivos puede ser mayor o igual que el salto entre la temperatura de revenido y la de austenización, pero si

apareciera este efecto se recomienda, como en el caso anterior, aumentar su potencia. Si la distribución es no uniforme, con modos TEM₀₀ o TEM_{01*}, se aconseja disminuir la velocidad relativa haz-probeta para que el segundo pico de temperatura entre en la zona de austenización o bien, disminuir la potencia aplicada para que, templando en la primera pasada propia, no llegue a la zona de revenido, en la segunda. En cualquier caso, sería deseable emplear una distribución TEM_{02*} más homogénea, a igualdad de intensidad media, pero a diferencia del caso de solape pequeño, se pueden obtener condiciones de temple tanto en la primera como en la segunda pasada.

5. CONCLUSIONES

En la tabla III se resumen las actuaciones aconsejadas y los resultados probables en cada uno de los casos anteriores.

En cuanto al aumento del número de pasadas, la prolongación del tratamiento en el tiempo, que esto conlleva, puede tener dos efectos negativos sobre el temple:

- Posible revenido bajo, no controlado.
- Fusión local en el centro de la banda, hacia el final del tratamiento.

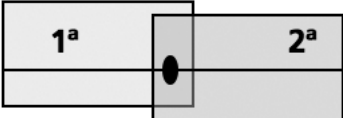

La disminución lineal, con el tiempo, de la potencia aplicada corrige el segundo de los efectos negativos mencionados y, si se lleva a cabo adecuadamente, no compromete la consecución de la temperatura de austenización. Sin embargo, no es efectiva para evitar el posible revenido bajo.

En este trabajo se ha llegado a conclusiones que indican pautas de variación de un parámetro dentro de una simulación para conseguir temple superficial. A raíz de estas conclusiones resulta manifiesta la necesidad de realización, en cada caso práctico real y de forma previa al tratamiento en sí, de un estudio numérico predictivo que establezca la combinación óptima de parámetros del proceso (en concreto, potencia del haz, distribución de intensidad, diámetro de enfoque, velocidad y, sobre todo, factor de solapamiento) al objeto de lograr unos resultados adecuados desde el punto de vista metalúrgico.

Este hecho, a pesar de imponer una aparente limitación a la practicidad de los tratamientos térmicos superficiales permite, sin embargo, el establecimiento de

Tabla III. Conclusión: resumen de posibles problemas en el temple, con indicación de las pautas recomendadas para solucionarlos y resultado probable tras aplicarlas

Table III. Conclusions: abstract of possible problems arising in hardening processes, with suggested solving actions and possible consequences

		Distribución	
		Uniforme	No uniforme (00 y 01*)
Pequeño solape			
	Problema	No temple	No temple
	Actuación aconsejada	Aumentar la potencia aplicada.	— Disminuir la velocidad. — Pasar a modo 02*
	Resultado probable	Templa	Templa
Gran solape			
	Problema	Templa y sufre un revenido	Templa y sufre un revenido
	Actuación aconsejada	Aumentar la potencia	— Disminuir la velocidad — Disminuir la potencia — Pasar a modo 02*
	Resultado probable	Sufre un doble temple	Sufre un doble temple

una metodología sistemática de realización de los mencionados procesos y de su diseño predictivo con suficiente aproximación. Ello, a su vez, permite la obtención de los mejores resultados posibles tanto en superficie como en profundidad en los procesos considerados de temple de superficies extensas con múltiples pasadas del haz, pues, a través de los resultados de simulación obtenidos, queda establecido el dominio paramétrico optimizado para los mismos, el cual puede, además, utilizarse como referencia para el potencial control automático del proceso^[20].

En todo caso, las estimaciones proporcionadas en el presente artículo se refieren a simulaciones numéricas que, a pesar de haber sido realizadas con un código de cálculo numérico (TEMPLUM) ya validado, necesitan ser confirmadas, en cuanto a alcance real, por los correspondientes datos experimentales.

REFERENCIAS

- [1] A. GARCÍA-BELTRÁN Y J.L. OCAÑA, *Rev. Metal. Madrid* 35 (1999) 75-83.
- [2] M. RAPPAZ, *Laser de Puissance et Traitements des Matériaux*, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, Francia, 1991, pp. 1-26.
- [3] J. C. ION, *The Industrial Laser Annual Handbook*, D. Belforte y M. Levitt (Eds.), Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma, 1992, pp. 39-47.
- [4] B. J. FERNÁNDEZ, J. RUIZ Y J. M. BELLÓ, *Rev. Metal. Madrid* 26 (1990) 16-25.
- [5] J. RUIZ, B. J. FERNÁNDEZ, J. M. BELLÓ, J. M. SANZ Y J. F. ZUBIRI, *Rev. Metal. Madrid* 26 (1990) 374-385.
- [6] L. GALANTUCCI Y L. TRICARICO, *Proc. LANE'94*, vol. I., M. Geiger y F. Vollertsen (Eds.), Meisenbach Bamberg, Erlangen, Alemania, 1994, pp. 254-262.
- [7] G. GUTIÉRREZ Y J. TIEN-CHEN, *Int. J. Heat Mass Tran.* 43 (2000) 2177-2192.
- [8] J. M. AMADO, C. ÁLVAREZ, G. NICOLÁS, A. J. LÓPEZ, J. A. PÉREZ, A. RAMIL, E. SAAVEDRA, J. SANESTEBAN, M. J. TOBAR Y A. YAÑEZ, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 365-368.
- [9] R. ROWSHAN Y M. K. BAÁN, *Proc. LANE 2004*, M. Geiger y A. Otto (Eds.), Meisenbach Bamberg, Erlangen, Alemania, 2004, pp. 859-864.
- [10] C. ÁLVAREZ, A. RAMIL, G. NICOLÁS, E. SAAVEDRA, A. J. LÓPEZ, J. A. PÉREZ, A. YAÑEZ Y J. L. OCAÑA, *Proc. LANE 2001*, M. Geiger y A. Otto (Eds.), Meisenbach Bamberg, Erlangen, Alemania, 2001, pp. 223-233.
- [11] A. GARCÍA-BELTRÁN, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 1996.
- [12] L. F. MARIN, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2002.
- [13] J. L. OCAÑA, A. GARCÍA-BELTRÁN, F. LAGUARTA, J. ARMENGOL, N. LUPÓN Y F. VEGA, *Appl. Optics.* 38 (1999) 4.570-4.576.
- [14] J. L. OCAÑA, A. GARCÍA-BELTRÁN, G. NICOLÁS, C. MOLPECERES, A. YAÑEZ, A. RAMIL Y M. AUTRIC, *Laser Eng.* 7 (1998) 199-213.
- [15] G. NICOLÁS, A. YAÑEZ, A. RAMIL, J. C. ÁLVAREZ, E. SAAVEDRA, A. GARCÍA-BELTRÁN, C. MOLPECERES, M. AUTRIC Y J. L. OCAÑA, *Appl. Surf. Sci.* 138 (1998) 169-173.
- [16] D. KECHEMAIR, Tesis Doctoral, Université de Paris Xi, 1989.
- [17] G. CAILLIBOTE, Tesis doctoral, Université d'Orsay-Paris 11, 1993.
- [18] H. HÜGEL Y F. DAUSINGER, *Handbook of the Eurolaser Academy*, D. Schuöcker (Ed.), Chapman Hall, Londres, Inglaterra, 2004, pp. 231-243.
- [19] I. URSU, A. M. PROKHOROV, I. N. MIHAILESCU Y V. I. CONOV, *Laser Heating of Metals*, Inst. of Physics Pub. Inc. Londres, Inglaterra, 1990.
- [20] C. MOLPECERES, R. CATALINA Y J. L. OCAÑA *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 195-204.