

Control de procesos de temple con láser mediante dispositivos pirométricos(*)

C. Molpeceres*, R. Catalina* y J.L. Ocaña*

Resumen Se presenta un sistema de regulación en tiempo real del temple de aceros con láser basado en el empleo de dispositivos pirométricos de radiación. Se incluye una descripción completa del dispositivo de monitorización junto con un análisis detallado del bucle de control, basado en un regulador por síntesis directa y su validación, especificando su concepción flexible y exportable a otro tipo de sistemas y tratamientos láser diferentes al empleado en el presente trabajo. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos aplicando el sistema en procesos reales de temple superficial en acero F-114, incluyendo un estudio paramétrico de las posibles variables de control a través de ensayos de dureza y profundidad de temple de las probetas tratadas.

Palabras clave Láser. Temple. Tratamientos superficiales. Control. Pirometría.

Laser heat treatment control using pyrometric devices

Abstract In this work, a detailed description of an on-line control system for laser heat treatments based on pyrometric monitorization, is presented. The study includes full details concerning monitorization devices and comprehensive description of the control loop, based on a direct synthesis regulator. The system validation and exportable character of the proposed method are also discussed. Finally, results obtained for CO₂ laser transformation hardening of F-114 steel are analyzed, including parametric analysis of control variables through metallurgical testing of the treated material.

Keywords Laser. Quenching. Surface treatments. Control. Pyrometry.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de tratamiento superficial de materiales con láser y, en particular, el temple superficial de aceros con láser de CO₂, han sido objeto de estudio detallado en los últimos años, con análisis de los procesos físicos inherentes a la interacción radiación-materia en dichas aplicaciones, modelización numérica de procesos y desarrollo de técnicas de caracterización experimental y monitorización de los mismos^[1-6].

En los procesos de tratamiento superficial con láser y, particularmente, en el temple, la dependencia de la calidad final del proceso con una serie de variables intrínsecas como son la potencia del láser, el tamaño de la mancha focal, la velocidad del proceso, la historia previa del material, etc., hacen inevitable el empleo de sistemas apropiados

de regulación que garanticen que el proceso se lleva siempre a cabo dentro de los parámetros óptimos de calidad. Dentro de estos sistemas juega un papel relevante la elección de la instrumentación utilizada para la monitorización del proceso, siendo los métodos más empleados, en la actualidad, los que se basan en la detección de radiación proveniente de la pieza procesada.

En este trabajo se ha desarrollado un sistema específico de control, basado en el uso de pirómetros de radiación que, tras validar y comprobar su carácter exportable, se ha empleado en ensayos de temple por láser de CO₂ en probetas de acero F-114, si bien por las prestaciones del sistema de monitorización y control es perfectamente utilizable con otro tipo de aceros, incluidos los inoxidables. Para dichos ensayos, el sistema láser empleado, de 500 W de potencia, se halla en el límite inferior de

(*) Trabajo recibido el día 24 de Julio de 2001 y aceptado en su forma final el día 21 de Marzo de 2002.

(**) Dpto. de Física Aplicada. E.T.S.I. Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. C/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006. Madrid (España).

operatividad admisible para obtener un tratamiento superficial caracterizable lo que, a la vista de los resultados obtenidos con la aplicación del sistema de control, confirman la bondad del sistema desarrollado y su carácter exportable en aplicaciones de temple con láser.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE TEMPLE CON LÁSER

En los procesos de temple de aceros con láser se producen capas de martensita superficiales que muestran un excelente comportamiento en dureza y una elevada resistencia al desgaste y a la fatiga. La mayoría de aceros de calidad que son templeables con métodos convencionales lo son, también, por láser. Sin embargo y debido a los tiempos extraordinariamente breves del ciclo de endurecimiento, la estructura de la matriz es un parámetro significativo y debe ser considerada *a priori*. Dado que la temperatura de austenización se alcanza muy rápidamente (con escaso crecimiento de grano) y siendo, por tanto, el tiempo de difusión para el carbono muy breve, son preferibles las matrices bainíticas o perlíticas con contenidos medio-alto en carbono^[1 y 5].

Los procesos de temple superficial con láser presentan una serie de ventajas asociadas al empleo de radiación luminosa como fuente de aporte energético a la pieza. En primer lugar, los tiempos de interacción son cortos, minimizando el aporte calórico total y reduciendo drásticamente el tamaño de la zona afectada térmicamente frente a otro tipo de tratamientos. Por otra parte, el propio haz luminoso es transportable a grandes distancias, fácilmente guiable y conformable, lo que facilita el procesamiento de geometrías complicadas o de difícil acceso con otro tipo de métodos de endurecimiento.

Como se ha comentado en la introducción, en la mayor parte de procesos de tratamiento con láser la calidad final obtenida puede variar apreciablemente en función de fluctuaciones de los parámetros del sistema, como son la potencia del láser o la velocidad de procesado, así como variaciones de los parámetros característicos del proceso de interacción (variación de la absorción). Pequeñas variaciones de estos parámetros pueden afectar la calidad final del proceso (p. ej., un cambio de un 10% en la potencia absorbida puede causar variaciones de hasta el 50% en la profundidad templada)^[7].

También es muy significativa la velocidad de enfriamiento de la pieza, dependiente de las caracte-

terísticas del material y de los posibles medios externos empleados para tal fin. En las piezas de pequeño volumen, este factor puede tener una influencia decisiva en la calidad final del proceso y debe ser objeto de un estudio previo a la realización del tratamiento.

En la práctica, se requiere monitorizar y realizar un control adecuado del proceso con vista a su desarrollo en condiciones óptimas.

3. MONITORIZACIÓN DE PROCESOS DE TEMPLE POR LÁSER

Las características de la instrumentación apropiada para la monitorización del proceso de temple por láser ha sido objeto de estudio detallado por varios autores^[3, 5, 7, 8 y 11], mostrándose como medios óptimos para su aplicación en la regulación y control del proceso, aquellos basados en la detección de radiación emitida por la superficie de la pieza como señal a partir de la cual inferir la temperatura de la misma.

Entre los métodos para medir temperatura, los dispositivos matriciales CCD, los fotodiodos simples y los pirómetros de radiación han sido los propuestos habitualmente para este fin, si bien todos ellos, especialmente con vistas a la regulación del proceso, presentan una serie de condicionantes que han de ser especialmente considerados en el diseño de los sistemas de regulación correspondiente.

De la instrumentación anterior, la más sencilla y menos costosa económicamente la constituyen los fotodiodos simples, si bien su empleo para procesos de temple requiere casi siempre correlación de señales procedente de más de un dispositivo, además de presentar una dificultad intrínseca de determinación del punto de medida, así como requerir, en la práctica, procesos de calibrado de cierta complejidad^[3].

En el caso de las cámaras térmicas basadas en dispositivos CCD^[5] se hace inevitable, por los tiempos asociados al procesado de datos de la propia cámara, el empleo de control distribuido que, comparativamente con el empleo de pirómetros, lo hace más complejo de integrar en situaciones reales, si bien la información lograda del dispositivo es mucho mayor, al poder obtenerse mapas completos de temperatura de la superficie de la pieza a procesar.

En este trabajo se optó por emplear un pirómetro de radiación. Este dispositivo está constituido por un sensor de radiación óptica de enfoque y

señal óptica del punto de medida, que lo convierte en un sistema robusto, de mayor facilidad de manejo que los fotodiodos simples y que ofrece, como salida, una señal eléctrica directamente proporcional a la radiación espectral recibida y, por lo tanto, directamente proporcional a la temperatura de la superficie procesada, tal y como se requiere para el control del tratamiento.

El fenómeno físico en el que se basa la pirometría de radiación es la emisión de radiación térmica por parte de cuerpos calientes. Teniendo en cuenta que la interacción del haz láser con la materia en aplicaciones de temple se realiza, fundamentalmente, en infrarrojo lejano o cercano (dependiendo del láser empleado), la radiación emitida por la superficie del mismo es una magnitud física idónea para correlacionar con la temperatura superficial del cuerpo objeto de estudio.

Idealmente, un cuerpo que absorbiera toda la radiación incidente define una potencia emitida por unidad de superficie (emitancia radiante total) obtenible directamente de la ley de Planck^[9] y ^[10], integrando a todo el rango espectral de longitudes de onda, resultando:

$$W = \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1),$$

expresión que corresponde a la ley de Stefan-Boltzmann, con:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (2),$$

siendo σ la constante de Stefan.

En la práctica, una superficie caliente real se desvía del comportamiento ideal anteriormente descrito, debiéndose introducir la emisividad de la superficie, ϵ , en general, parámetro variable ya que depende de la naturaleza de la superficie, de la longitud de onda, de la dirección, polarización y ángulo de incidencia, lo que debe ser tenido en cuenta en el proceso de medida^[9], dado que, en ese caso, la emitancia radiante debe expresarse en la forma:

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad (0 < \epsilon \leq 1) \quad (3)$$

Otro factor a tener en cuenta en la emisividad es que la que la distribución direccional de la radiación puede ser diferente de la difusa. En superficies no ideales, la emisividad puede tomar diferentes valores según se esté interesado en una longitud de onda determinada (propiedad monocromática) o en una dirección determinada del es-

pacio (propiedad direccional). Aparece así el concepto de emisividad direccional monocromática $\epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,T)$ de una superficie, dependiente de la longitud de onda, el ángulo formado con la vertical y la temperatura de la superficie emisora^[10].

En general, se ha de tener en cuenta que la emisividad depende, en gran medida, de la naturaleza de la superficie que puede estar influida por el método de fabricación, ciclo térmico y reacción química con su medio. Por lo tanto, la temperatura que se registrará en el pirómetro no debe considerarse como una medida absolutamente exacta sino, más bien, como un método de medida de magnitudes relativas, suficiente para conseguir un sistema de monitorización de datos.

Normalmente, los dispositivos pirométricos se calibran para un cuerpo negro e incorporan un sistema de corrección de emisividad que debe ajustarse en función de las características de la superficie a tratar. En este trabajo se han adoptado las siguientes simplificaciones para el tratamiento de esta variable del proceso.

- No se tendrá en cuenta la influencia o variación de la emisividad con la longitud de onda, debido a que el pirómetro trabaja en una franja estrecha y baja del espectro electromagnético (4,5-5,5 μm).
- La emisividad direccional de un emisor difuso (aproximación de cuerpo real a cuerpo ideal, en el cual se supone que las propiedades como la emisividad no dependen de la dirección) es una constante independiente de la dirección. Sin embargo, aunque esta condición es, a menudo, una aproximación razonable (principalmente en superficies con rugosidad baja), todas las superficies exhiben alguna desviación de esta situación ideal. En el caso de aceros, la dependencia angular de la emisividad, $\epsilon(\theta)$, es, aproximadamente, constante para ángulos $\theta < 40^\circ$, por lo que, en la práctica, el pirómetro se coloca formando un ángulo de, aproximadamente, 20° con la vertical. Así, se asegura que se mantiene dentro de la zona donde la emisividad que afecta al proceso es, aproximadamente, igual a la emisividad normal, que es la que aparece calibrada en tablas y ensayos previos^[6].
- En lo que hace referencia a la dependencia de la emisividad con la temperatura, conviene tener en cuenta que, una vez fijada la emisividad para la temperatura de consigna a la que se vaya a operar, las variaciones posteriores que se produzcan en la misma durante el tratamiento no

producirán errores considerables ya que, como establece la Ley de Stefan-Boltzmann, la radiación integrada es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura y solo linealmente proporcional con la emisividad. Es decir, un pirómetro de radiación trabajando con longitudes de onda pequeñas es mucho más sensible a cambios de temperatura que a cambios de emisividad. Como ejemplo, en la figura 1 se muestra gráficamente el error de temperatura medida frente a variaciones de emisividad a una temperatura de 1.000 °C, observándose que cuando la emisividad utilizada es un 20 % mayor de la nominal, únicamente se produce un error del 4 % en la medida de la temperatura. Este tipo de errores son aceptables en el sistema de monitorización y control que se pretende utilizar.

Al margen de su principio de funcionamiento como sistema de monitorización, desde el punto de vista de su integración en un sistema completo de control, el pirómetro es un dispositivo capaz de captar la radiación emitida mediante una óptica de enfoque adecuada que garantiza la zona de medida exacta y, normalmente, está equipado con un tipo de detector de radiación que se comporta, desde el punto de vista de la señal de salida, como una fuente de intensidad convertible a tensión y de entrada directa a una tarjeta de adquisición de datos. En aplicaciones industriales es conveniente que este dispositivo cumpla una serie de requisitos, listados a continuación, para que su aplicación práctica resulte ventajosa en la monitorización de procesos de temple con láser:

- Debe ser considerablemente insensible a cambios en la emisividad del material a procesar ya que, si no, se producirán errores considerables.

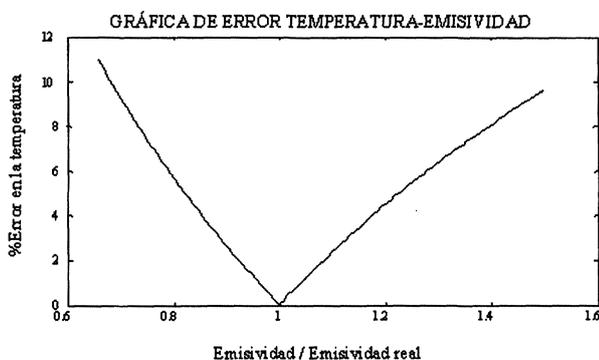


Figura 1. Variación del error en la temperatura frente a variaciones de la emisividad a 1.000 °C.

Figure 1. Temperature error variation vs emissivity at 1000 °C

- Debe ser capaz de medir temperaturas entre los 800 y los 1.500 °C.
- Debe ser suficientemente rápido como para detectar cambios en la temperatura.
- No debe ser sensible a la radiación que el láser refleje sobre el pirómetro. En el caso del láser de CO₂, el pirómetro no debe ser sensible a la radiación de 10,6 μm.
- No debe ser sensible a longitudes de onda en las que el aire absorbe una parte de la radiación emitida ya que, ello puede causar errores. Los rangos más adecuados son: 0,4-1,3; 2,0-2,6; 3,0-4,1; 4,5-5,5 y 8,0-9,5 μm.
- Debe ser, eléctrica y mecánicamente, robusto.

Tras valorar estos requisitos funcionales, el pirómetro elegido para los experimentos desarrollados en el presente trabajo fue un modelo de la casa MAURER, con una cabeza de medición modelo ETPbSe-Z(G) y un sistema óptico IR 100 M, estando comprendido su intervalo de medición entre los 300 y los 2.000 °C, con un tiempo de respuesta de, aproximadamente, 10 ms y capaz de captar radiación dentro del rango espectral de 4,5 a 5,5 μm.

La cabeza de medición del pirómetro está protegida contra campos electromagnéticos mediante una pantalla que la hace totalmente válida para trabajar en las cercanías de inductores, electrodos y demás generadores de campos, sin peligro de que se falseen las medidas. Además, el equipo está dotado de un visor que permite alinear, exactamente, la zona de medición con el cabezal de medición del pirómetro. Esta zona de medición puede aumentarse o disminuirse, variando la óptica del pirómetro, teniendo siempre en cuenta que el resultado de la medida será un promedio de las temperaturas puntuales existentes en el área de medición, ya que el dispositivo pirométrico realiza una medida integrada en esa superficie que, en cualquier caso, se tiene en cuenta en el proceso de calibración. En la figura 2 se observa la disposición relativa entre el pirómetro de radiación y la pieza, junto con la mancha anular de enfoque del dispositivo dirigida al punto de medición que, en este caso, coincidirá con el tamaño del haz sobre la superficie de la pieza. En este sentido, el pirómetro dispone de un visor que proyecta un anillo de luz sobre la superficie a medir. Es imprescindible que la parte interior del anillo coincida con la zona sobre la que interacciona el haz láser, para obtener, así, una medición más fiable de la temperatura que está alcanzando la superficie tratada y, en función de este dato, poder obtener una relación entre temperatura, profundidad de temple y dureza

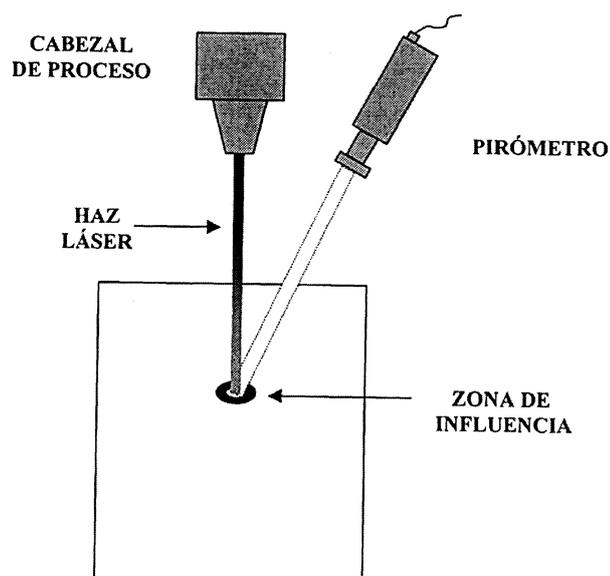


Figura 2. Montaje del pirómetro. Aparece marcado el anillo de la zona de medición del pirómetro sobre la superficie de la pieza.

Figure 2. Experimental set-up. The ring-shaped measurement zone of the pyrometer over the target surface is shown.

causada por el tratamiento, de forma que se pueda diseñar un sistema de control que, una vez ajustado el valor de consigna, provoque los cambios deseados en la potencia láser incidente sobre el material.

Por último, conviene destacar que la ventana de medición del pirómetro, situada en el intervalo de 4,5-5,5 μm (sin interferencia con la longitud de onda fundamental del láser de CO_2), así como su rango de medición, de 300 a 2.000 $^\circ\text{C}$, cubre de forma adecuada el intervalo de temperaturas características del temple con láser, ofreciendo, además, la posibilidad de aplicar el sistema a otro tipo de tratamientos superficiales (recubrimientos, aleaciones superficiales, etc.), manteniendo el mismo sistema de medida y con escasos retoques en el sistema de control^[11 y 12].

4. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL

Con la señal obtenida del pirómetro analizado en el punto precedente, la concepción del sistema de control se basa en un bucle cerrado como el que se muestra en la figura 3 y en el cual se pueden destacar los siguientes elementos:

- PC de control: en él se ejecuta el *software* que controla la monitorización del proceso, reali-

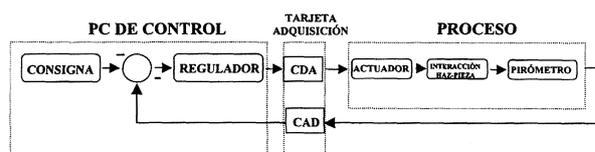


Figura 3. Diagrama del bucle de control en lazo cerrado empleado. Las siglas CDA y CAD hacen referencia a un convertidor digital-analógico y analógico-digital respectivamente.

Figure 3. Closed loop diagram corresponding to the controlled process. CDA and CAD stand for Digital-Analogic and Analogic-Digital converters.

zándose el algoritmo del control discreto del bucle de control mediante realimentación negativa. Este *software* de control permite configurar la tarjeta de adquisición, la señal de referencia, los parámetros del regulador y el almacenamiento de información del proceso.

- Proceso: elemento que agrupa el actuador láser, la interacción láser-materia y la captación de la señal mediante el pirómetro.
- Tarjeta de adquisición de datos: seleccionada de 12 bits, con una frecuencia máxima de muestreo de 100 kHz e intervalo de medida de 0 - 10 V ó -5 - +5 V.
- Circuito de tratamiento de la señal proveniente del pirómetro: constituido por un convertidor intensidad-tensión de tipo transresistencia, que traduce la señal suministrada por el pirómetro (0-20 mA) al rango utilizado en la tarjeta de adquisición de datos (0-10 V); un filtro paso-bajo de tipo Butterworth de quinto orden, que proporciona una frecuencia de corte en torno a los 5 Hz, y un ajuste fino de la ganancia para mejorar la exactitud de la medición. Mediante este circuito, aparte de adecuar la señal captada, se reduce el ruido originado en el cableado del sistema y demás interferencias.

Para el diseño del sistema de control se trabajó con un único canal analógico de entrada, operando en modo diferencial entre 0 y 10 V, donde se introduce la señal proveniente del filtro paso-bajo que prepara la señal captada por el pirómetro. Así mismo, mediante un canal de salida analógica, se introdujo, como entrada al potenciómetro regulador de la salida del láser, una tensión limitada entre 0,7 y 1,97 V en el láser, lo que permite variar su potencia entre 80 y 460 W (los datos de calibración de las fuentes permiten suponer una relación lineal entre voltaje y potencia de salida).

Partiendo de estos elementos se debe, en primer lugar, analizar el método de control más adecuado para el proceso. En este caso, y dadas las características del sistema, se optó por el método clásico de control discreto monovariante. Para su integración, se debe determinar, en primer lugar, la función de transferencia discreta que caracteriza al proceso para, una vez obtenida, diseñar un regulador por el método de síntesis directa o de Truxal que haga que se cumplan las especificaciones.

El control del proceso se realizó actuando, únicamente, sobre la potencia suministrada al material, por lo que la función de transferencia tuvo como entrada la potencia y como salida la temperatura superficial del acero, adimensionalizada en tensión, de forma que 0 V equivale a 300 °C y 10 V a 2.000 °C (intervalo de medición del pirómetro empleado).

Debido a los relativamente elevados tiempos de respuesta, característicos de los procesos de temple con láser, con relación a otras aplicaciones de esta herramienta y a la elevada inestabilidad del sistema láser (por estar trabajando en los valores extremos de potencia nominal), no resultó factible realizar ensayos frecuenciales que permitieran obtener un diagrama de Bode del sistema. En su lugar, se optó por realizar una serie de ensayos en acero F-114 con escalones de potencia generados mediante incrementos de tensión en la señal de consigna introducida en el resonador del láser. Una vez almacenada la señal captada por el pirómetro, se procesó ésta mediante un *software* diseñado en Matlab® de forma que, introduciendo la señal de entrada, la de salida y los tiempos característicos de inicio y fin del régimen transitorio y permanente, se pudieran estimar la función de transferencia del proceso y otros datos de interés (diagramas de Bode, lugar de las raíces, errores medios en la estimación, etc.).

La función de transferencia estimada para el tipo concreto de ensayos realizados (Fig. 4a)), engloba al actuador, resonador láser, interacción láser-materia, captación mediante el pirómetro, filtrado paso-bajo y conversión analógico-digital. Ésta posee un cero en -0,3322, dos polos, uno en 0,9489 y otro en 0,3413 y una ganancia aproximada de 1.218,4. En ella, se observa la elevada lentitud del sistema (en torno a los 2,14 s de tiempo de establecimiento) debida, esencialmente, a la interacción láser-materia y a la inercia térmica del material.

Una vez estimada la función de transferencia del sistema, el regulador encargado de minimizar el

efecto de las perturbaciones se diseñó mediante el método de Truxal, teniendo en cuenta que se deben evitar sobreoscilaciones en la señal de la temperatura ya que éstas provocarían imperfecciones en el acabado de la pieza; que la tensión aplicable a las fuentes de tensión del resonador se encuentra limitada, superiormente, por 1,97 V e, inferiormente, por 0,7 V; que, debido a la lentitud del sistema y a la existencia del limitador de tensión, no se puede obtener una respuesta dinámica rápida para el sistema en lazo cerrado (ya que ello implicaría valores elevados de tensión en el régimen transitorio, que no son permisibles en el sistema que nos ocupa); y que, finalmente, habrá que llegar a un compromiso entre la dinámica del sistema y la sobreoscilación de la tensión, evitando por tanto un comportamiento brusco del tipo “todonada” en la tensión.

Con todas estas premisas y teniendo en cuenta los criterios de Truxal de estabilidad, simplicidad y causalidad, se eligió el modelo más simple posible con un polo y una ganancia, tal que la ganancia del sistema en lazo cerrado fuese unitaria, con lo que el error en régimen permanente se haría nulo (Fig. 4b)). El valor de dicho polo se eligió teniendo en cuenta los criterios mencionados anteriormente y en función de la tensión aplicada, de forma que se eviten picos no manejables en el láser. Con todo ello, la función de transferencia del regulador obtenida fue:

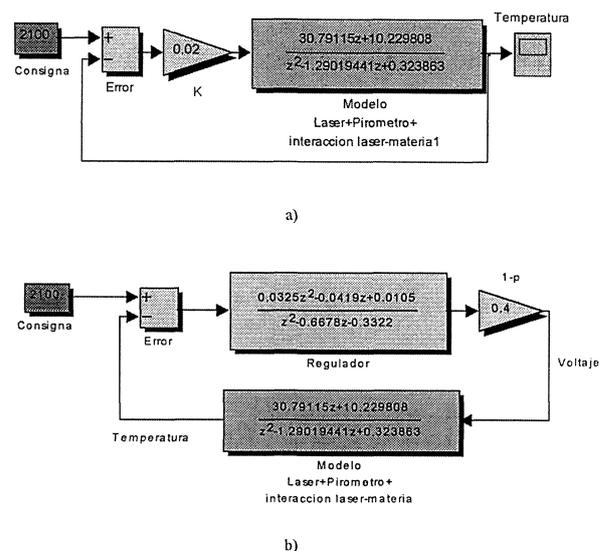


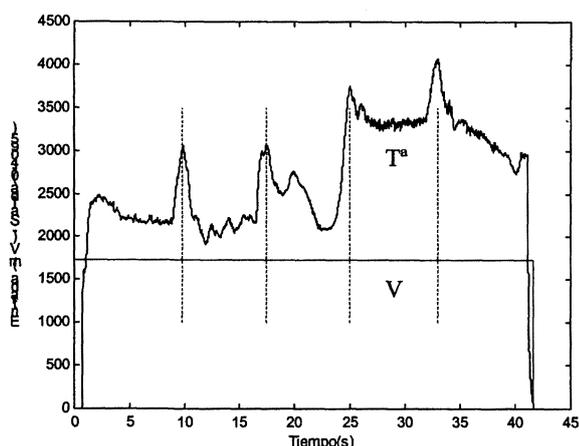
Figura 4. Diagrama del bucle de control a) cerrado con regulador proporcional y b) regulador por síntesis directa final para la señal de potencia.

Figure 4. Process control loop a) closed with proportional regulator b) closed with direct synthesis regulator.

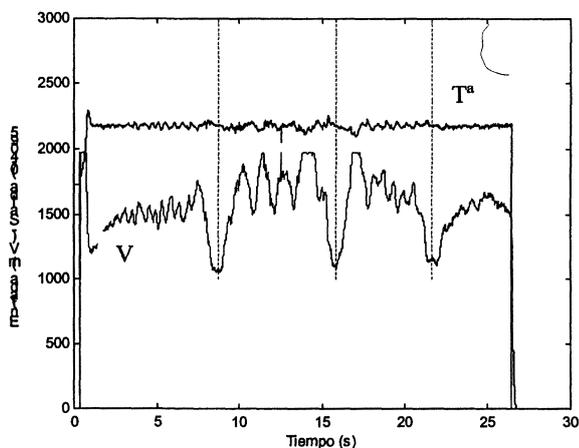
$$R(z) = \frac{0,1z^2 - 0,1290z + 0,0324}{30,7912z^2 - 20,5613z - 10,2298} \quad (4)$$

Una vez implantado el regulador, se realizaron diversos ensayos para verificar la validez del mismo, los más importantes de los cuales se detallan en el apartado siguiente. Son destacables, sin embargo, desde el punto de vista del control a realizar, los resultados obtenidos ante perturbaciones de temperatura en el acero. Así, en la figura 5 se puede ver el comportamiento del sistema en cadena abierta, a), mientras que en la gráfica b) aparece la respuesta del sistema con el regulador.

En estas figuras se puede observar cómo el sistema reacciona frente a la perturbación reduciendo la señal de control, con lo que la temperatura se mantiene constante. Ensayos realizados ante esca-



a)



b)

Figura 5. Comportamiento del sistema en cadena abierta a), y con regulador b).

Figure 5. System response without a) and with b) regulator.

Rev. Metal. Madrid 38 (2002) 195-204

lones de velocidad de procesado de, hasta 30 mm/min, han mostrado un comportamiento similar, proporcionando unos resultados positivos.

5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Los ensayos experimentales para verificar el comportamiento del sistema de control se realizaron con un láser de CO₂, que suministraba una potencia máxima de 500 W, con un rendimiento de un 90 %, debido al sistema de enfoque. Se trabajó situando el foco del sistema óptico a 30 mm de la superficie, lo que resultaba en un *spot* circular de 1,5 mm de diámetro en la pieza. La irradiancia resultante sobre la pieza corresponde aproximadamente a 25 KW/cm². Su modo de emisión para los ensayos correspondía a un TEM₀₀. El material empleado fue un acero F-114 de dureza base 219 HV con probetas de forma cilíndrica de 10 mm de altura y 50 mm de diámetro, de forma que se realizaron cuatro "surcos" concéntricos en cada cara de la pieza (en la figura 6, se muestra la microestructura obtenida por láser en uno de los surcos), enfriándose la pieza entre cada ensayo para no falsear las medidas. El gas de aporte empleado fue aire y la óptica de enfoque refractiva. Así mismo, se hizo variar la velocidad de procesado entre 90 y 190 mm/min y la temperatura superficial de consigna entre 900 y 1.200 °C. El ancho en superficie de la zona templada (ancho de temple) y la profundidad máxima de temple se determinaron mediante el análisis *a posteriori* de las probetas seccionadas. Los ensayos de dureza, en Vickers, se realizaron con un microdurómetro Matsuzawa Seki con carga de 1 kg. Con el sistema de control implantado, estos ensayos permiten concretar el intervalo de valores de dureza y profundidad que se pueden obtener.

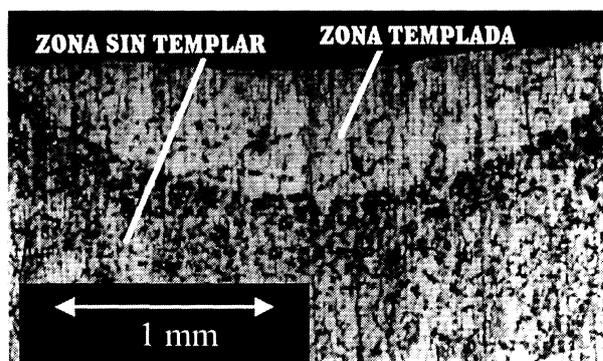


Figura 6. Micrografía de la zona templada de una de las probetas.

Figure 6. Micrograph of F-114 steel after laser treatment.

En la figura 7a) se muestran los resultados del ancho de temple obtenido frente a la velocidad, para diferentes temperaturas de consigna. En ella, se puede apreciar que la temperatura superficial alcanzada ejerce la influencia más clara sobre el ancho en superficie de la zona templada, de modo que, al aumentar aquella aumenta el ancho de temple. Pero, también es apreciable la alta influencia que la velocidad de proceso tiene sobre las propiedades finales del material. Se observa que existe un margen de velocidades entre 130 y 150 mm/min en el que el ancho de temple es mayor, de forma que al aumentar o disminuir la velocidad de proceso, la zona templada disminuye. Al disminuir la velocidad de proceso, el tiempo de interacción láser-materia es mayor, con el consiguiente incremento del aporte energético, no consiguiéndose disipar adecuadamente la energía aportada. Así, la curva de enfriamiento es más lenta y no se consigue una transformación martensítica completa, con lo que la zona templada es menor. Al aumentar la velocidad, el tiempo de mantenimiento en la zona austenítica no es lo suficientemente grande como para conseguir la transformación de la cementita y el hierro alfa en austenita, necesaria para una correcta formación de la martensita en la siguiente fase de enfriamiento. Por todo ello, señalaríamos la velocidad de 130 mm/min y la temperatura de 1.200 °C como la pareja de datos de consigna ideales para el proceso.

En la figura 7b) se muestra la profundidad máxima templada frente a la velocidad, para diferentes temperaturas de consigna. Al igual que en el caso anterior, se puede observar que la mayor influencia en la profundidad de temple corresponde al parámetro de consigna "temperatura superficial", así como que al elevar dicho parámetro se obtiene una mayor penetración del temple. Como en el caso del ancho en superficie de la zona templada, la profundidad de la misma se ve influida por la velocidad de proceso, de una forma no lineal, existiendo un rango de velocidades entre los 130 y los 150 mm/min en los que la profundidad de temple es mayor. Por el mismo hecho reseñado anteriormente, al aumentar la velocidad de proceso disminuye el tiempo de mantenimiento en la zona austenítica, por lo que disminuye la profundidad de temple, al no alcanzarse las condiciones adecuadas para una correcta transformación martensítica. De igual modo, al disminuir la velocidad de proceso por debajo del "margen correcto", la velocidad de enfriamiento es menor y no se consigue una correcta formación de martensita. Tam-

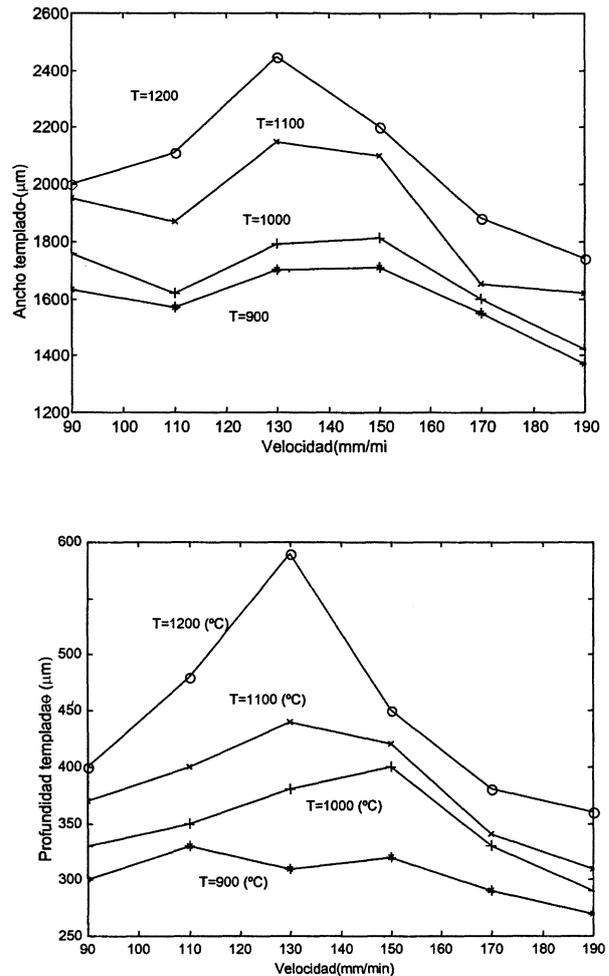


Figura 7. Resultados obtenidos para: a) ancho en superficie de la zona templada, en función de la velocidad para diferentes temperaturas y b) profundidad de la zona templada en función de la velocidad.

Figure 7. Results obtained for: a) Width of hardened zone vs velocity for different temperatures and b) hardened depth vs velocity for different temperatures.

bién, en este caso, la pareja de valores óptimos para un templado correcto sería de 1.200 °C como temperatura de consigna y 130 mm/min como velocidad de proceso.

Aparte de los ensayos y las mediciones efectuadas, se debe tener en cuenta la estructura adquirida por el acero tras el proceso de temple. Como se ha mostrado, la temperatura no debe ser superior a 1.200 °C, ya que se favorecería la aparición de zonas fundidas, empeorando el acabado final de la pieza. Al estudiar los efectos sobre el temple, de un descenso de la temperatura por debajo de los 900 °C, se debe tener en cuenta el tipo de estructura que aparece en la zona templada.

Para observar este hecho resulta útil el empleo de análisis microfotográfico en las probetas.

Los resultados obtenidos al temprar con una temperatura superficial de 900 y 1.200 °C se aprecian en las figuras 8 y 9, respectivamente (en ambas figuras, la velocidad relativa haz-pieza es de 170 mm/min). Se observa claramente cómo, al disminuir la temperatura de consigna a 900 °C, aparece una gran heterogeneidad en la microestructura del acero, lo que no será deseable en ningún caso.

6. CONCLUSIONES

Mediante el trabajo desarrollado se probó la mejora sustancial que supone un sistema de control y monitorización para los tratamientos de temple superficial con láser. Además, el empleo de dispositivos pirométricos posibilita la utilización de un sistema de monitorización fiable y robusto, especial-

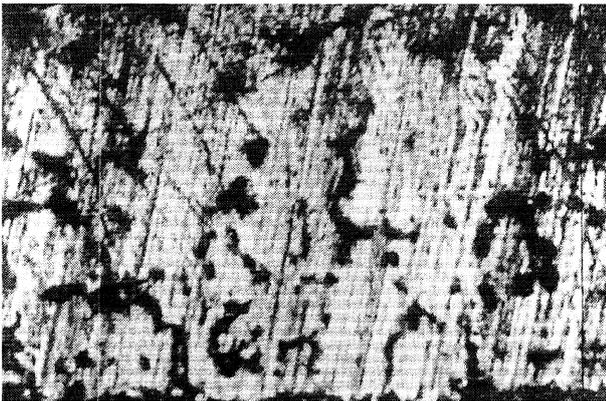


Figura 8. Detalle de la zona templada ($T=900$ °C).

Figure 8. Hardened zone structure ($T=900$ °C).

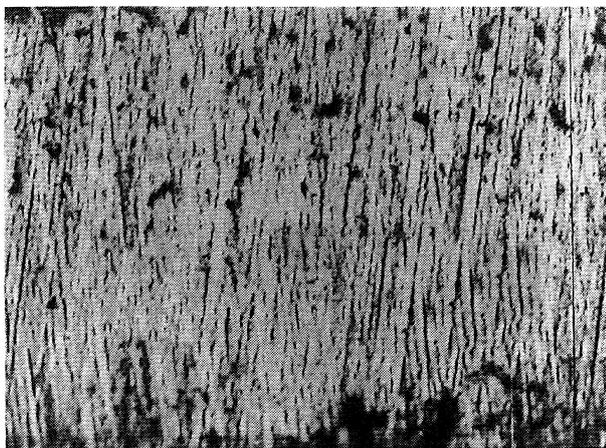


Figura 9. Detalle de la zona templada ($T=1.200$ °C).

Figure 9. Hardened zone structure ($T=1200$ °C).

Rev. Metal. Madrid 38 (2002) 195-204

mente apropiado para su inclusión en un sistema completo de regulación y control, no sólo en procesos de temple sino en otros procesos regulables a partir de la determinación de la temperatura superficial.

El sistema se validó y verificó experimentalmente mediante ensayos reales en un equipo situado en el límite de potencia útil para realizar ensayos de temple, lo que lo habilita para su empleo en dispositivos de mayor potencia, que son los habitualmente empleados a nivel industrial para este tipo de tratamientos. Se demostró, por tanto, que la inclusión de un sistema de control en tiempo real como el propuesto mejora sustancialmente la capacidad de obtención de calidad y acabado satisfactorio en la pieza templada, y, más especialmente, en piezas de pequeño volumen en las que, debido al recalentamiento que va adquiriendo la pieza, sería imposible realizar un temple adecuado sin dicho sistema de control.

Entre los resultados adicionales obtenidos cabe destacar que en el tratamiento de temple superficial por láser es posible compensar determinadas perturbaciones con la modificación en tiempo real de parámetros como la velocidad o la potencia, con el objeto de mantener la calidad del tratamiento dentro de unos ciertos márgenes preestablecidos. Esto se ha demostrado en los experimentos realizados, mediante diversos ensayos ante perturbaciones severas, incluido el sobrecalentamiento que sufren piezas de pequeño volumen. Otro hecho observado es que la desaparición del aporte energético en un breve lapso de tiempo provoca que el material pierda su inercia térmica y el proceso pierda el punto de equilibrio en que se estaba trabajando, siendo imposible recuperar la temperatura de consigna mediante el único control de la potencia suministrada. Mediante el sistema de control y monitorización se redujo esta inestabilidad no deseable, si bien se estima mejorable la respuesta del sistema mediante el empleo de un posible control multivariable que mejorara la respuesta del sistema en al cercanía de puntos críticos.

REFERENCIAS

- [1] W. AMENDE, *Industrial applications of lasers*, Ed. H. Koenner, Wiley (Sussex), 1984, pp. 79-92.
- [2] A. GARCÍA BELTRÁN y J.L. OCAÑA, *Rev. Metal. Madrid* 35 (1999) 75-83.
- [3] D. KECHEMAIR, Tesis Doctoral, Universidad de Paris-Sud, Centre D'Orsay, 1989.

- [4] J.L. OCAÑA, *Review of Mathematical Models of High Power Laser Material Processing*, EU-194 Working Group on Mathematical Modelling, Eds. Technische Universität Viena, Austria, 1993.
- [5] G.R.B.E. RÖMER, Tesis Doctoral, Universidad de Twente, 1999.
- [6] MAGNUSSON C., *Technical report*, Lulea University of Technology, Suecia, 1994.
- [7] H.W. BERGMANN y E. GEISLER, *2nd European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'88*, Dusseldorf, Alemania, 1988, pp. 109-113.
- [8] H.W. BIELER, G. HERZIGER y K. WISSENBACH, *2nd European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'88*, Dusseldorf, Alemania, 1988, pp. 46-53.
- [9] F.P. INCROPERA y D.P. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*, Ed-Prentice Hall, 1999.
- [10] Y.S. TOULOUKIAN y D.P. DEWITT, *Thermophysical properties of matter*, TPRC Data series, 1990.
- [11] F. HERRERO ACEBES, Tesis doctoral, E.T.S.I.-I.M, Universidad Politécnica de Madrid, 1997.
- [12] J.L. OCAÑA et al., *Appl. Opt.* 38 (1999) 4.570-4.576.