

Diseño de un Sistema de Monitorización y Control de Procesos de Tratamiento Térmico Superficial de Materiales con Láser Mediante Realimentación de Estados

J. A. Pérez , J. L. Ocaña , C. Molpeceres , M. Morales , M. Blasco , A. García

*Departamento de Ingeniería Industrial II. Universidad de La Coruña.
Escuela Politécnica Superior. c.\ Mendizábal s/n. 15403 – Ferrol (La Coruña).*

*Centro Láser de la Universidad Politécnica de Madrid.
E.T.S. Ingeniería Industrial. c.\ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 – Madrid.*

Resumen

En el presente artículo se propone el empleo de un innovador Controlador Lineal Mínimo Cuadrático para Procesos de Tratamiento Térmico Superficial de Materiales con Láser, el cual mediante realimentación del vector de estados permite incrementar considerablemente la calidad y uniformidad de los tratamientos realizados, reduciendo de forma significativa la tasa de rechazos y mejorando significativamente la productividad y eficiencia del proceso. De un modo complementario, además de analizar las prestaciones del sistema de control propuesto en base a los criterios típicos de validación, tales como la sobreoscilación y el tiempo de asentamiento, se analizan también otros parámetros de interés, tales como el tiempo y el conocimiento necesario para su diseño e implementación.

Palabras Clave: Aplicaciones Industriales del Láser, Procesado de Materiales, Tratamientos Térmicos Superficiales, Control Lineal Mínimo Cuadrático, Filtro de Kalman.

Abstract

This paper presents an innovative Linear Quadratic Gaussian Control System for Laser Surface Heat Treatments, which allows to increase significantly the uniformity and final quality of the obtained products, reducing the rejection rate and increasing considerably the productivity and efficiency of the treatment. Besides to analyze the main characteristics and advantages of the developed control system, using the typical validation criteria, such as the overshooting and the settling time, in a complementary way, it is analyzed other unusual parameters of great practical interest, as the design and tuning time, as well as the experience and knowledge necessary for its design and implementation.

Keywords: Laser Materials Processing Applications, Surface Heat Treatments, Process Monitoring and Control, Linear Quadratic Gaussian Controllers, Kalman Filter.

1. Introducción

Desde la aparición de las primeras fuentes láser en los años sesenta, el campo de aplicación de la tecnología láser ha crecido constantemente, proporcionando excelentes prestaciones bajo severas condiciones de trabajo, convirtiéndose en una tecnología clave en sectores productivos altamente estratégicos, entre los que cabe destacar las telecomunicaciones, la metrología, la medicina, el control de contaminación y el procesado de materiales

En el campo del procesado de materiales, las principales ventajas de los tratamientos mediante láser frente a otras técnicas convencionales se derivan esencialmente de la elevada densidad de energía altamente focalizada que proporciona la fuente láser, lo cual genera elevados ratios de calentamiento y enfriamiento, permitiendo realizar tratamientos superficiales altamente localizados y de espesores muy reducidos, con una mínima alteración del material base o sustrato

Desde el punto de vista metalúrgico, estas particulares condiciones de tratamiento generan microestructuras especiales, con un elevado refinamiento de grano, dando lugar a diversas fases metaestables con propiedades excepcionales

Como consecuencia de las excepcionales prestaciones de la tecnología láser, se ha creado una falsa sensación de madurez tecnológica, si bien un análisis en profundidad permite detectar todavía infinidad de aspectos y cuestiones sin resolver, fundamentalmente en el área de la monitorización y el control del proceso

Entre las principales limitaciones para la aplicación industrial a gran escala de la tecnología láser cabe destacar la posible falta de uniformidad en el tratamiento como consecuencia de la elevada sensibilidad del proceso a perturbaciones externas, derivadas esencialmente de inestabilidades en la fuente láser e imperfecciones en el acabado superficial del elemento a tratar.

Las irregularidades en el tratamiento pueden dar lugar a un comportamiento inaceptable del producto final, como consecuencia de una disminución de su resistencia al desgaste, a la fatiga o a la corrosión, requiriendo un postprocesado del mismo o incluso conllevar su rechazo y destrucción, con el consiguiente incremento de coste

Todas estas consideraciones permiten establecer la necesidad de desarrollar un sistema de monitorización y control del proceso en tiempo real capaz de mantener el proceso dentro de las condiciones nominales de trabajo, mejorando la uniformidad del tratamiento e incrementando la calidad final del producto obtenido

2. Diseño del Sistema de Control

La Teoría de Control Óptimo surge en los inicios de la Era Espacial, inspirada en la capacidad de los seres vivos para mantener su equilibrio homeostático dentro de un estricto margen con un mínimo consumo de recursos, mediante el empleo de complejos mecanismos de control realimentado

Conceptualmente, los sistemas de control mediante realimentación de estados tienen por objeto llevar el sistema al estado de equilibrio deseado en un tiempo razonable, minimizando una función de coste cuadrática en la que se pondera tanto la sobreoscilación de los estados de la planta, así como la actuación necesaria para alcanzar el equilibrio, empleando como señal de control $u(k)$ una combinación lineal de las variables de estado de la planta $X(k)$ [4]:

$$u(k) = -K \cdot X(k) \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que generalmente no es posible medir directamente el estado de la planta mediante sensores convencionales, típicamente se emplea como estimador del vector de estados un Filtro de Kalman convenientemente sintonizado, el cual estima el vector de estados en el siguiente instante de muestreo $X(k+1)$, a partir de la señal de salida de la planta proporcionada por los sensores $y(k)$ y la señal de actuación $u(k)$, respondiendo a la siguiente ecuación lineal en diferencias

$$X(k+1) = A_k \cdot X(k) + B_k \cdot \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

En base a estas consideraciones, se ha desarrollado y evaluado el comportamiento de un controlador lineal mínimo cuadrático, empleando como variable de entrada la máxima temperatura alcanzada en la superficie del material medida mediante un pirómetro infrarrojo y como señal de actuación la potencia de salida del resonador láser, cuya estructura se representa en el diagrama de bloques de la figura 1.

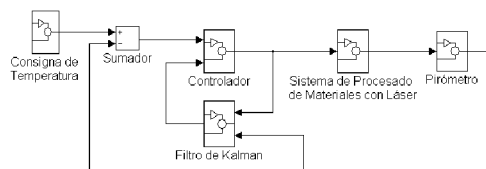


Figura 1. Lazo de Control del Proceso

3. Validación Experimental

La optimización y validación experimental del sistema de control desarrollado se ha efectuado íntegramente en las instalaciones del Centro Láser de la Universidad Politécnica de Madrid, empleando un resonador láser de CO₂ de alta potencia

La figura 2 presenta un detalle del interior de la estación de procesamiento de materiales con láser empleada, en la que se puede observar la disposición de los elementos más importantes: el cabezal láser, el elemento a tratar y el pirómetro infrarrojo empleado como sensor de monitorización del proceso:

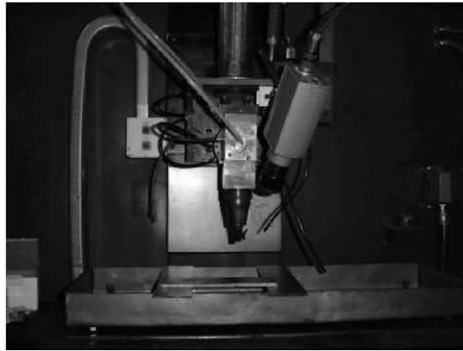


Figura 2. Estación de Procesado de Materiales con Láser

Con el objeto de demostrar completamente la viabilidad y la utilidad del sistema de control propuesto, la figura 3 presenta un ensayo de validación sistemática, en el cual, siguiendo el procedimiento estándar de validación de controladores se han aplicado diversos escalones en la temperatura de referencia, obteniendo excelentes resultados:

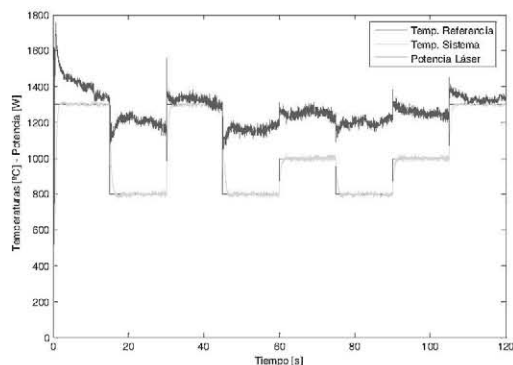


Figura 3. Ensayo de Validación Sistemática

El aspecto final del elemento tratado puede observarse en la figura 4, en la que los cambios en el brillo en la superficie del material están directamente correlacionados con los distintos escalones en la temperatura de proceso:



Figura 4. Detalle de la Zona Tratada

Una vez contrastada la eficiencia del controlador usando los criterios estándar de validación en Ingeniería de Sistemas, analizando el comportamiento del sistema de control frente a escalones en la señal de referencia, se ha analizado su robustez frente a cambios en la velocidad de proceso, emulando las perturbaciones derivadas de la capacidad de aceleración finita del sistema de posicionamiento de la fuente láser.

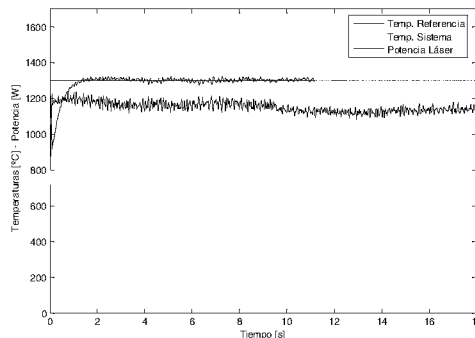


Figura 5. Perturbaciones en la Velocidad de Proceso

Los cambios en la velocidad de proceso constituyen una de las principales fuentes de perturbación del proceso, por cuanto en una primera aproximación su influencia es

proporcional a $\frac{1}{\sqrt{\text{velocidad}}}$, lo que significa que en el ensayo presentado en la figura 5,

en el que se ha duplicado la velocidad de proceso a los 9,5 segundos, en ausencia del sistema de control la temperatura del tratamiento se habría reducido en un 30% aproximadamente, poniendo de manifiesto las excelentes prestaciones del sistema.

4. Conclusiones

Desde un punto de vista práctico, para el usuario final los parámetros más importantes a la hora de evaluar las prestaciones de cualquier sistema de control para procesos de tratamiento térmico superficial de materiales con láser son la sobreoscilación y el tiempo de asentamiento, por cuanto mientras el sistema no alcance el régimen

permanente la calidad de tratamiento puede ser deficiente, mientras que la sobreoscilación puede provocar la fusión parcial del material, con el consecuente deterioro del acabado superficial del mismo

A pesar de la complejidad y el elevado grado de no linealidad del proceso, la respuesta del sistema de control propuesto es plenamente satisfactoria, proporcionando un tiempo de subida inferior a 1,1 segundos y una sobreoscilación inferior al 2,5 %, así como un elevado grado de uniformidad en la respuesta, constituyendo un referente para el control de procesos de tratamiento de materiales con láser

Para el diseñador, una vez contrastada la utilidad del sistema de control, adquiere además gran interés analizar la complejidad y los recursos necesarios para el diseño e implementación física del sistema de control propuesto. A este respecto, cabe destacar que si bien las etapas iniciales del proceso de diseño del controlador están relativamente estandarizadas, el ajuste fino de los distintos parámetros operativos requiere un profundo conocimiento del proceso, conocimiento no adquirible trivialmente, siendo crucial disponer de un buen modelo matemático del proceso

Como conclusión final, además de las excelentes prestaciones del sistema de control propuesto, cabe destacar el creciente interés científico durante los últimos años en el desarrollo de sistemas de control multivariable para procesos de tratamiento térmico superficial de materiales con láser, controlando además de la potencia del resonador láser, la velocidad relativa de desplazamiento del haz, en los que las técnicas de control óptimo basadas en la realimentación de estados ocupan un lugar preponderante

5. Referencias

- J. M. Amado, A. Yáñez, J. A. Pérez et al. *Rev. Metalurgia*, 40(2004), 365-368.
- A. García, J. L. Ocaña, *Rev. Metalurgia*, 35(1999), 75-83.
- R. E. Kalman. *Transactions of the ASME. Journal of Basic Eng.*, 82 (1960), 35-45.
- W. S. Levine. *The Control Handbook*, IEEE Press, CRC Press, Londres (U.K.), 1996.
- C. Molpeceres, R. Catalina y J. L. Ocaña, *Rev. Metalurgia*, 38(2002) 195-204.
- J. A. Pérez, Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior, Univ. La Coruña, 2004.
- J. A. Pérez, J. L. Ocaña. *Anales Ing. Mecánica.*, 15 (2004), 2039-2044.