

Estudio de las fases metalográficas de aleaciones superficiales obtenidas por técnicas láser mediante segmentación de imágenes^(*)

M. Tejera*, A. Mavilio*, M. Fernández*, G. Muñiz* y R. Varela*

Resumen Mediante la aplicación de un láser, como fuente de energía, sobre superficies de acero recubiertas con una pasta de carburo de titanio, se obtuvo una aleación con una estructura metalográfica compleja, cuya caracterización se realiza en el presente trabajo. Con los aceros tratados se prepararon probetas para su estudio metalográfico, de las cuales se obtuvieron imágenes por microscopía óptica, que permitieron detectar tres zonas de interés metalográfico bien definidas. Con imágenes de estas zonas se confeccionó un banco de texturas, correspondientes a las mismas. Mediante la utilización de los descriptores de textura, Histograma Diferencia (HD) y Dimensiones Promediadas (DP), se realizó la identificación de estas zonas en secciones de otras imágenes de aceros sometidos al mismo procedimiento y la segmentación de imágenes construidas con texturas correspondientes a las diferentes zonas. Se logró, de esta manera, determinar de forma cualitativa la presencia de estas zonas para las muestras estudiadas y, además, estudiar la variación de la textura en la zona afectada por el calor, en la que ocurren transformaciones de fases en estado sólido pudiéndose de esta manera evaluar la efectividad de los descriptores propuestos.

Palabras clave Fases metalográficas. Láser. Segmentación de imágenes. Textura.

Laser alloying metallographic study by image segmentation techniques

Abstract In this work are presented the metallographic characteristics of an alloy obtained by means of the application of a laser beam on a titanium carbide powder layer deposited in a steel surface. The treated steel was studied by optic microscopy and three well defined metallographic interesting zones were observed. Texture patterns corresponding of these zones were obtained from these images. The identification and the segmentation of these zones using the method of Difference Histogram (DH) and a Run Length variant (RL) is realized in sections of images of steels treated with the same procedure. A procedure for the qualitative detection of these zones in laser steel alloying and to study the texture modification in the heat affected zone is obtained. In this way is evaluated the proposed descriptors effectiveness.

Keywords Metallographics phases. Laser. Image segmentation. Texture.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo del láser como fuente de energía para mejorar propiedades superficiales en metales, tratamientos térmicos, aleaciones y recubrimientos, ha adquirido una gran importancia en la actualidad^[1]. En particular, la obtención de aleaciones superficiales con buenas propiedades mecánicas sobre superficies metálicas es una técnica que ha encontra-

do variadas aplicaciones en los últimos años^[2]. Como resultado de su aplicación aparecen, en las muestras tratadas, diferentes zonas de características estructurales y físicas distintas, que pueden ser identificadas a través del análisis digital de las imágenes de dichas muestras, donde las zonas mencionadas poseen características texturales también diferentes.

(*) Trabajo recibido el día 15 de enero de 2004 y aceptado en su forma final el día 13 de julio de 2005.

(*) Departamento de Física, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba, e-mail : adriana@electrica.cujae.edu.cu; FAX : (537) 267-29-64 Phone : (537) 260-74-19

Una tarea importante para todo sistema de análisis de imágenes consiste en realizar la segmentación de una imagen dada en regiones distinguibles entre sí, a partir de sus propiedades. La segmentación de las imágenes de muestras sometidas al tratamiento láser permite estudiar los cambios estructurales provocados dentro de la muestra, en dependencia de los parámetros que caracterizan la técnica utilizada y valorar la calidad de la aleación obtenida.

La mayoría de las investigaciones sobre segmentación de imágenes tratan la segmentación por textura. Este, es un problema aún difícil de abordar, debido a las complejidades que entraña la descripción de las características texturales de las imágenes metalográficas.

En las últimas décadas se han propuesto diversos métodos para la segmentación por textura^[3-5]. En la actualidad, se manifiesta la tendencia al empleo de técnicas más sofisticadas, como las que utilizan los filtros de Gabor^[6-8] y las *wavelets*^[9-11], entre otros.

En este trabajo, se aborda la segmentación de imágenes construidas a partir de imágenes metalográficas, con el objetivo de evaluar la capacidad de los descriptores propuestos y del método empleado para identificar, por su textura, las tres zonas de interés metalográfico: el acero original, la zona afectada por el calor, en la que ocurren transformaciones de fase en estado sólido y la aleación superficial propiamente dicha. Se valora la presencia cualitativa de diferentes fases y se logra visualizar la variación de las propiedades texturales en la región de transformaciones de fases, la cual presenta una apariencia no homogénea.

Con este objetivo, se emplearon dos conjuntos de descriptores texturales, el de Histogramas Diferencia, HD^[12] y el de las Dimensiones Promediadas, DP^[13], con los que se realizaron dos etapas de segmentación: una, supervisada y otra, no supervisada. Estos métodos fueron seleccionados por ser de fácil implementación, bajo costo computacional y por la demostrada efectividad en la clasificación de este tipo de texturas.

2. OBTENCIÓN DE ALEACIONES MEDIANTE TRATAMIENTO LÁSER

Este proceso es un método de endurecimiento superficial láser en el cual, el aumento de la dureza y otras características de la capa superficial se alcanza, no sólo por los cambios estructurales y transformaciones de fase en la zona de acción del láser, si-

no también por causa de la creación de una nueva aleación que se diferencia del material base en su composición química. En el fundamento de la nueva aleación está el sustrato, por lo que las características de la capa aleada dependerán del mismo. En determinados trabajos^[14 y 15], se exponen los resultados en la obtención de aleaciones superficiales láser sobre un acero cuya composición química se expone en la tabla I, aplicando los materiales aleantes como una pasta sobre el sustrato metálico. La composición de la pasta es 90 % de TiC, 9,6 % de Fe y 0,4 % de B, mezclados con una goma orgánica que se evapora durante el calentamiento láser y no interviene en el proceso de aleación. El tamaño de los granos fue menor de 20 nm y el espesor de la capa aplicada de 250 nm. El láser utilizado presentó una potencia en la superficie de trabajo de 1,9 Kw y la instalación experimental utilizada responde al esquema que se da, a continuación, en la figura 1.

Al realizar un proceso de aleación láser superficial adicionando carburo de titanio, en un acero al 0,65 % de carbono, resultan tres regiones que corresponden a la zona de mezcla (aleación), la zona intermedia (transformaciones de fase) y la zona de acero no afectada por el calor, tal y como se observa en la imagen obtenida por microscopía óptica, mostrada en la figura 2.

Tabla I. Composición química del acero base

Table I. Steel base chemical composition

Composición química del acero								
elemento	C	Mn	Si	P	Cr	Mo	Ni	Ti
%	0,64	0,68	1,25	0,012	-	-	-	-

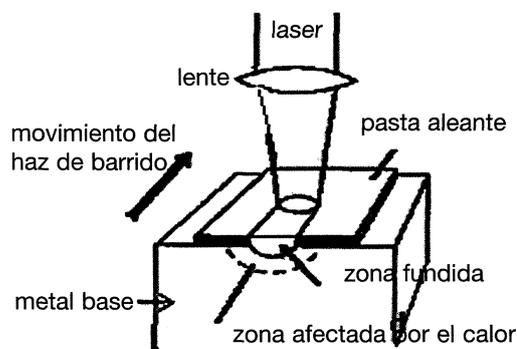


Figura 1. Esquema experimental utilizado para obtener las aleaciones superficiales.

Figure 1. Experimental set used to obtain surface alloys.

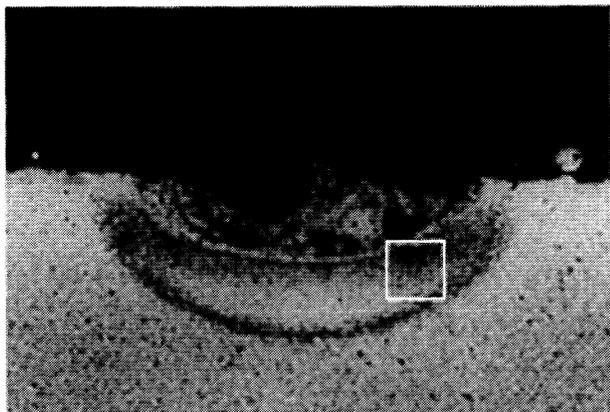


Figura 2. Imagen obtenida por microscopía óptica del corte transversal de una aleación de acero (0,65 % C) más Carburo de Titanio obtenida con LÁSER. Se observan tres regiones que corresponden, en orden descendente, a la aleación superficial, la zona afectada por el calor y a la zona del metal base.

Figure 2. Optical microscopy image corresponding to the cross cut of a steel alloy (0,65% C) with Carbide of Titanium probe obtained with LASER. Three regions are observed: the surface alloying, the heat affected zone and the original metal.

Las zonas presentes en la imagen metalográfica mostrada son: la aleación obtenida en la superficie producida al fundirse simultáneamente por la acción del láser el material base y la pasta de carburo de titanio depositada sobre éste. A continuación de esta primera zona y a partir de los puntos para los cuales la temperatura resulta ya inferior a la temperatura de fusión de estos materiales, se observa una segunda zona donde ocurren transformaciones de fase en estado sólido, del tipo de las que ocurren en el temple convencional de acero y, por último, la zona no afectada por el calor, en la cual no existe ningún tipo de transformación.

3. EL HISTOGRAMA DIFERENCIA Y LAS DIMENSIONES PROMEDIADAS

El Histograma Diferencia, (HD), propuesto por Unser^[12], hace uso de la estadística de primer orden de la imagen $Y_{d_1, d_2}[i, j]$, obtenida al restar la imagen original, $Y[i, j]$, con su réplica, con un desplazamiento relativo entre ambas de $[d_1, d_2]$. De esta forma, se logra reducir el volumen de trabajo asociado al cálculo de parámetros propios de la estadística de segundo orden.

Esta imagen auxiliar se obtiene de:

$$Y_{d_1, d_2}[i, j] = Y[i + d_1, j + d_2] - Y[i, j] \quad (1)$$

Aplicando la regla de decisión bayesiana y suponiendo una ley de distribución multinomial para los valores de los histogramas $x = \{x_1, x_N\}$ se completa el método de clasificación.

La imagen cuyo histograma es x , pertenece a la clase "i", si

$$U_i(x) = \min \{U_j(x)\}, j = 1, \dots, k \quad (2)$$

donde,

$$U_j(x) = - \sum_{i=1}^N x_i \log [P_j(i)] \quad (3)$$

siendo $P_j(i)$ la probabilidad de que el HD tome el valor x_i para la clase "j". Estos valores se obtienen de los HD de los patrones que definen las clases.

Las Dimensiones Promediadas (DP)^[13] son las longitudes medias de los segmentos maximales conexos, para cada nivel de gris y dada una orientación. En este caso, como descriptores estadísticos se proponen las dimensiones medias de las regiones con iguales niveles de gris. Estas dimensiones se obtienen al promediar las longitudes de todos los segmentos continuos de la imagen que posean el mismo nivel de gris, orientados en las direcciones elegidas, en este caso, 0°, 45° y 90°. Estos descriptores tienen sus antecedentes en las *run-lengths*^[16], de las cuales constituyen una modificación.

Un algoritmo sencillo para extraer estas magnitudes resulta de barrer una sola vez la imagen, $Y[i, j]$, con $i = \{1, NX\}$, $j = \{1, NY\}$ y $Y = \{1, NG\}$, donde NG son los niveles de grises y NX y NY son las dimensiones de la imagen, obteniendo los siguientes valores:

$$H[Y(i, j)] = H[Y(i, j)] + 1 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{NumSaltos } 0^\circ [Y(i, j)] &= \\ &= \text{NumSaltos } 0^\circ [Y(i, j)] + \text{SGN}[Y(i-1, j) - Y(i, j)] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{NumSaltos } 45^\circ [Y(i, j)] &= \\ &= \text{NumSaltos } 45^\circ [Y(i, j)] + \text{SGN}[Y(i-1, j) - Y(i, j)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{NumSaltos } 90^\circ [Y(i, j)] &= \\ &= \text{NumSaltos } 90^\circ [Y(i, j)] + \text{SGN}[Y(i-1, j) - Y(i, j)] \end{aligned} \quad (7)$$

$H[Y]$ acumula los valores del histograma para todos los niveles de gris de 1 a NG . Cada valor $H[Y]$ del histograma es el número de píxeles en la imagen con valor Y , lo que es igual a la suma de todos los segmentos continuos de la imagen con

ese valor, barriendo la misma en cualquier dirección. $NumSaltos 0^\circ [Y]$ contiene el número de saltos en la imagen, del valor f hacia cualquier otro, en la dirección horizontal. Esto es, el número de segmentos continuos de ese valor de nivel de gris que se pueden encontrar barriendo la imagen en dicha dirección. Finalmente, $H[Y]/NumSaltos 0^\circ [Y]$, da la dimensión promediada de las regiones conexas con nivel de gris Y en la dirección 0° . De igual manera se procede para el resto de las direcciones escogidas.

En este caso, como clasificador se emplea un criterio de mínimos cuadrados.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS FASES EN LA IMAGEN METALGRÁFICA

Para la identificación de las zonas presentes en la imagen metalográfica se llevó a cabo una segmentación supervisada contando, para ello, con el banco de patrones apropiado. La segmentación se realizó moviendo una ventana por la imagen de forma tal que, al pixel central de la misma, se la asigna la clase correspondiente a la textura de la porción contenida en dicha ventana.

El tamaño de la ventana se varió desde 6×6 hasta 12×12 píxeles, encontrándose como apropiado para esta tarea particular el de 10×10 píxeles. La figura 3 muestra los resultados de la segmentación de una imagen, creada a partir de dos texturas (aleación y acero base), por los dos métodos probados y utilizando ventanas de 10×10 y de 12×12 .

En la figura 4 se muestran los resultados de otra prueba, esta vez utilizando solamente la ventana de 10×10 píxeles.

Finalmente, la figura 5 muestra la segmentación de una imagen construida con regiones de las tres zonas de interés.

5. VISUALIZACIÓN DE LA ZONA DE TRANSFORMACIONES DE FASES

La zona intermedia de la micrografía mostrada en la figura 2 es la que presenta mayor complejidad, presentando diferentes fases, que se producen como resultado de los cambios en estado sólido en la estructura del metal base, por su calentamiento a temperaturas inferiores a la temperatura de fusión. De esta forma, se obtiene una gradación de la textura vinculada a estas transformaciones, determinada por la variación de parámetros físicos, tales como el campo de temperaturas promotor de las mismas, la velocidad de enfriamiento, etc. Una dirección futura de trabajo consistirá en el uso de estos resultados, luego de una adecuada calibración para obtener, por ejemplo, el correspondiente campo numérico de temperaturas.

Con el objetivo de visualizar las fases presentes en esta zona se realizó una segmentación no supervisada. Partiendo del resultado del clasificador que evalúa la relación entre el conjunto de descriptores asociado a la textura en la vecindad de cada pixel y el conjunto de descriptores correspondientes a una zona homogénea en textura, elegida al azar, se estudió el histograma del campo escalar generado, para determinar el número de clases y los umbrales que las delimitan.

En la figura 6 se observa una imagen muestra de la zona afectada por el calor y la segmentación realizada por el método de DP.

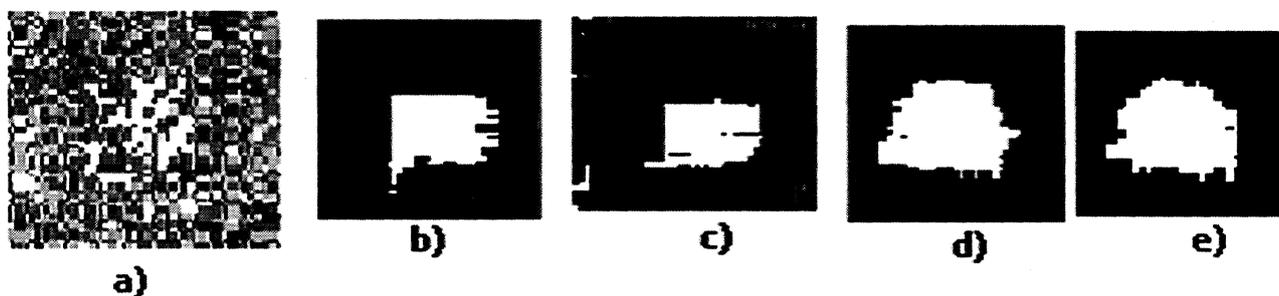


Figura 3. Resultados de la segmentación de una imagen, creada a partir de dos texturas (aleación y metal base), por los dos métodos estudiados a) Imagen. b) Segmentación obtenida por el método de HD con una ventana de 10×10 píxeles. c) Segmentación obtenida por el método de HD con una ventana de 12×12 píxeles. d) Segmentación obtenida por el método de DP con una ventana de 10×10 píxeles. e) Segmentación obtenida por el método de DP con una ventana de 12×12 píxeles.

Figure 3. Segmentation results of the an modeled image starting from two textures (alloy and base metal), for the two studied methods. a) Image. b) Segmentation obtained by the HD method with a window of 10×10 pixels. c) Segmentation obtained by the HD method with a window of 12×12 pixels. d) Segmentation obtained by the DP method with a window of 10×10 pixels. e) Segmentation obtained by the DP method with a window of 12×12 pixels.

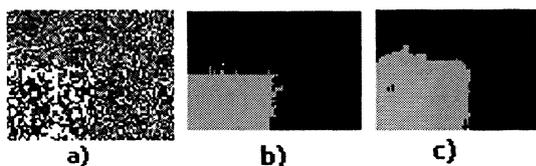


Figura 4. Resultados de la segmentación de una imagen creada a partir de las texturas correspondientes a la aleación y al metal base. a) Imagen creada. b) Resultados obtenidos por el método Histograma Diferencia HD con una ventana de 10 x 10 píxeles. c) Resultados obtenidos por el método Dimensiones Promediadas DP con una ventana de 10 x 10 píxeles.

Figure 4. Segmentation results of an image created from alloy and base metal textures. a) Image. b) Results obtained by the HD method with a window of 10 x 10 pixels. c) Results obtained by the DP method with a window of 10 x 10 pixels.

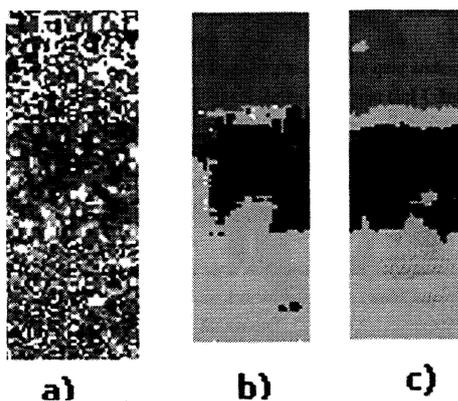


Figura 5. Resultados de la segmentación de una imagen construida con regiones de las tres zonas de interés: aleación, zona afectada por el calor, y metal base. a) Imagen construida. b) Resultados obtenidos por el método de Dimensiones Promediadas con una ventana de 10 x 10 píxeles. c) Resultados obtenidos por el método de Histograma Diferencia con una ventana de 10 x 10 píxeles.

Figure 5. Segmentation results of an image created using sections of the three considered zones: alloy, heat affected zone and base metal. a) Image. b) Results obtained by the DP method with a window of 10 x 10 pixels. c) Results obtained by the HD method with a window of 10 x 10 pixels.

6. CONCLUSIONES

Se estudió, mediante técnicas de segmentación de texturas, la imagen metalográfica de una aleación superficial obtenida por láser y las transformacio-

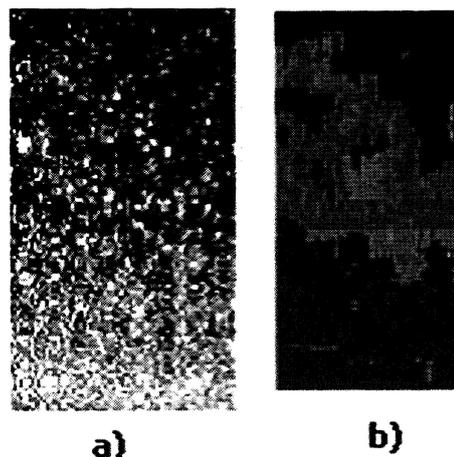


Figura 6. Resultados de la segmentación no supervisada de una sección de la imagen real correspondiente a la zona afectada por el calor: a) Imagen real. b) Resultados obtenidos por el método Dimensiones Promediadas con una ventana de 10 x 10 píxeles.

Figure 6. Results of the non supervised segmentation of a real image section, taken from the heat affected zone. a) Image. b) Segmentation results by the DP method for a 10 x 10 pixels window.

nes de fases presentes en la zona afectada por el calor asociada a ésta. Los resultados permiten asegurar que estas técnicas de segmentación constituyen un método alternativo para la detección de las zonas presentes en la microestructura resultante de la aplicación de esta técnica de endurecimiento superficial de metales con láser.

Se concluye, además, que los descriptores HD y DP son apropiados para llevar a cabo la tarea de segmentación correspondiente a la determinación de las zonas y fases presentes en las imágenes metalográficas, aunque hay que tener presente que la eficiencia del método de HD disminuye, sensiblemente, cuando el histograma de las imágenes o porciones estudiadas se separan del estado ecualizado.

La segmentación no supervisada realizada con estos descriptores resultó adecuada para estudiar una imagen como la de la zona de transformaciones de fases, donde *a priori* se desconoce el número de clases presentes.

El método permite, además, la obtención del perfil numérico de temperaturas así como una evaluación cuantitativa del porcentaje presente de cada fase en la zona estudiada. Estos dos aspectos serán objetivos de trabajos posteriores.

REFERENCIAS

- [1] G. MUÑIZ, A. CONDE, B.J. FERNÁNDEZ, R. VARELA, I. GARCÍA Y J. DE DAMBORENEA, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 443-451.
- [2] C. DRAPER Y C. EWING, *J.Mater. Sci.* 19 (1984) 3.815-3.825.
- [3] S.W. ZUCKER, A. ROSENFELD. Y L. DAVIS, *IEEE Trans. Comp.* 24 (1975) 1.228-1.232.
- [4] R.M. HARALICK Y L.G. SHAPIRO, *Comp. Vis. Graph. Img. Process.* 29 (1985) 100-111.
- [5] C.S. WON Y H. DERIN, *CVGIP: Graph. Mod. Img. Process.* 54 (1992). 308-400.
- [6] T.P. WELDON Y W.E. HIGGINS, *Proc. ICIP-94, Austin, Texas* (1994) T-II, 620-624.
- [7] Y.Y. ZHOU LONGBOTHAN, *Proc. ICIP-94, Austin, ,Texas*, (1994) T-II, 630-633.
- [8] M. FERNÁNDEZ, A. MAVILIO Y J.R. FERNÁNDEZ, *Proc. 15th Int. Conf. Pattern Recognition, IEEE, Barcelona* (2000) 3, Image, Speech and Signal Processing,. 358-361.
- [9] M. FERNÁNDEZ *et al.*, *Appl. Optics* 41 (2002) 6.745-6.750.
- [10] M. FERNÁNDEZ Y A. MAVILIO, *AIP Conf. Proc.* 630, VI *Mexican Symposium on Medical Physics* ISBN 0-7354-0084 (2002).164-168.
- [11] P. PALISSON. ET AL., *Proc. ICIP-94, Austin, ,Texas, T-II* (1994) 625-630
- [12] M. UNSER, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 8, No.1(1986), 118-125
- [13] M. TEJERA, Tesis de maestría. Departamento de Física del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (CUJAE). Ciudad Habana. Cuba (2000).
- [14] G. MUÑIZ, Tesis de Doctorado, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, 1990.
- [15] G MUÑIZ, *Proc. SPIE 2730 USA, (1996).*558-563.
- [16] R.M. HARALICK, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* SMC-3 6, (1973) 610-621.