

MEDIDA DEL DESGASTE EN UN ENSAYO DE FRETTING MEDIANTE MICROSCOPIO CONFOCAL

G. Jordano, C. Navarro*, J. Vázquez, J. Domínguez

Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España

*Persona de contacto: cnp@us.es

RESUMEN

Se ha analizado el desgaste producido en ensayos de fatiga por fretting con contacto esférico realizados con la aleación de aluminio 7075 T651. Las huellas de fretting tienen forma circular, y en estas se distinguen dos zonas: una zona central circular de adhesión y una zona exterior de deslizamiento con forma de anillo. Esta última zona se distingue porque aparece dañada por desgaste y oxidación. El objetivo de este trabajo consiste en distinguir dichas zonas, determinar su tamaño y posición, medir el desgaste y establecer una relación con las tensiones que aparecen en el contacto. Para ello se ha utilizado un microscopio confocal que proporciona un mapa de la superficie: profundidad frente a posición. Dado que las huellas no suelen estar muy limpias, las imágenes y datos obtenidos con el microscopio se someten a una serie de tratamientos digitales de forma que al final se obtienen los parámetros deseados. Finalmente, los datos experimentales se combinan con los cálculos analíticos mediante el modelo de desgaste de Archard.

PALABRAS CLAVE: Fretting Esférico, Huella, 7075T651, Desgaste, Microscopio Confocal.

ABSTRACT

Wear has been analyzed in several fretting fatigue tests with spherical contact performed on Al 7075 T651. The scars have a circular shape showing the contact zone and, inside of it, another circular zone called the stick zone can be distinguished. The rest of the contact zone is called the sliding zone. The latter appears clearly damaged by wear and oxidation. The objective of this paper is to measure the size of these zones and their position, measure the wear in the sliding zone and establish a relation with the stresses at the contact. This has been done using a confocal microscope which gives a map of the surface: depth at each position. Given that the scar does not appear as an ideal circumference, the images have gone through a process of digital processing in order to obtain the geometric characteristics. Finally, the experimental data is combined with the analytical calculations through Archard wear model.

KEYWORDS: Spherical Fretting, Scar, 7075T651, Wear, Confocal Microscope

INTRODUCCIÓN

La fatiga por fretting es un fenómeno de daño que puede ocurrir en multitud de componentes de máquinas y estructuras como uniones atornilladas y roblonadas, acoplamientos con ajuste a presión, cadenas, etc. [1]. En estos casos se producen pequeños desplazamientos relativos entre las superficies en contacto bajo presión. Esto, en conjunción con la fricción, genera unas tensiones tangenciales en las superficies en contacto. Estas tensiones locales de contacto se superponen a las tensiones globales de todo el componente, produciendo un efecto similar al de los concentradores de tensión. Debido a estas tensiones aparecen grietas en la zona de contacto mucho antes que si no hubiera contacto entre las partes, grietas que pueden desarrollarse posteriormente pudiendo dar lugar a la fractura final del componente.

Además de la iniciación prematura de grietas también se produce un desgaste en la superficie que genera un deterioro y con ello una modificación de la distribución de tensiones. Esto quiere decir que para tener un buen modelo del comportamiento de los componentes a fatiga por fretting habría que incorporar la evolución del desgaste y por lo tanto de la distribución de tensiones conforme se aplican ciclos de carga.

En este artículo se estudia el proceso de desgaste en un ensayo de fatiga por fretting en el que se ha utilizado como par de contacto el formado por una esfera y un plano. El desgaste se mide con microscopio confocal, y a partir de éste, y de la presión y deslizamiento en cada punto del contacto se obtendrá una constante que permitiría modelar el desgaste en función de los ciclos de carga aplicados.

ENSAYO DE FRETTING

En la figura 1 se muestra un esquema del montaje del ensayo con las cargas que se aplican. A los elementos de contacto con superficie esférica de radio 100 mm se le aplica una fuerza constante N . Posteriormente se aplica una carga axial cíclica P (que da lugar a una tensión axial σ), y debido a la rigidez del sistema esto provoca en el contacto una carga tangencial Q también cíclica y en fase con P .

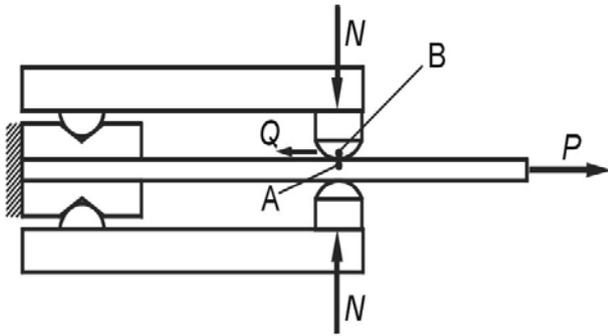


Figura 1. Esquema del puente de fretting.

Se analizarán dos ensayos realizados sobre una aleación de aluminio 7075 T651. Uno de ellos con un tratamiento de shot-peening (SP) y donde las cargas aplicadas fueron $\sigma = 110$ MPa, $Q = 900$ N y $N = 1000$ N. El otro fue sometido a un tratamiento de láser-peening (LP) y donde las cargas aplicadas fueron $\sigma = 90$ MPa, $Q = 1100$ N y $N = 1200$ N. Los detalles completos de estos ensayos se pueden ver en [2]. Las huellas típicas de este tipo de contacto presentan una zona de contacto circular cuyo radio, a , depende de la fuerza normal aplicada, el radio de la esfera, y de los módulos de Young y Poisson del material. Dentro de la zona de contacto se distinguen a su vez dos zonas: la de adhesión y la de deslizamiento. La de adhesión tiene forma circular y su radio, c , depende de la relación entre la fuerza tangencial, el coeficiente de rozamiento y la fuerza normal. Por último, la posición de esta zona sería concéntrica si no hubiera carga axial pero al haberla aparece una pequeña excentricidad, e , en la dirección de aplicación de la carga.

ANÁLISIS DE LAS HUELLAS

La microscopía confocal es una técnica que permite la medición 3D de la topografía de superficies mediante la adquisición de una secuencia de imágenes ópticamente seccionadas a través de la profundidad del foco del objetivo. La señal más alta dentro de la secuencia de imágenes para cada píxel se correlaciona con la altura de la topografía. Unas de las principales ventajas de esta técnica respecto a otras técnicas ópticas son una alta resolución lateral y la capacidad de medir pronunciadas pendientes locales [3].

La medición de la topografía de las probetas ensayadas se realizó con el microscopio confocal SENSO FAR S NEOX©. El microscopio junto con el objetivo de diez aumentos NIKON X10 EPI© empleado, es capaz de medir superficies de hasta $1754 \times 1320 \mu\text{m}^2$ y pendientes locales de hasta 86° en superficies rugosas, con una resolución lateral de $1.29 \mu\text{m}$ y una resolución vertical de 25 nm . El equipo también permite medir superficies mayores (hasta $700 \times 600 \text{ mm}^2$) solapando áreas del mismo tamaño, cuyas dimensiones máximas dependen del objetivo empleado, para formar una retícula. Las superficies medidas fueron de $4911 \times 3538 \mu\text{m}^2$ para la probeta SP y de $4911 \times 3696 \mu\text{m}^2$ para la probeta LP, empleando en ambos casos una retícula de 3×3 áreas.

La medición se realiza para cada área individual mediante un barrido vertical. La amplitud de éste para la probeta con LP fue de $120 \mu\text{m}$ y para la probeta con SP de $160 \mu\text{m}$. El ajuste de la luz es un punto importante a la hora de realizar la medición ya que si ésta es insuficiente no se medirían los puntos en las zonas donde se ha producido desgaste ya que estas zonas reflejan menos la luz. Por el contrario, si la luz es excesiva aparecerían picos en la superficie medida debidos a la alta reflexión. Por ello, la medición se tomó para dos niveles de luz diferentes para todo el rango del barrido. Los niveles de luz fueron de 15% y 1.5% para la probeta con LP y 25% y 1.5% para la probeta con SP. El software del programa (SensoSCAN 6.1) selecciona automáticamente la mejor solución para cada punto. En la zona donde se ha producido la fractura se observa el efecto de los picos debido a su alta reflexión. No se pudo corregir este efecto ajustando el nivel de luz.

Tras la medición se obtiene una imagen 3D de la muestra, una imagen 2D de la misma en la que la altura de cada punto viene dada por un código de colores y un listado con las coordenadas X, Y, Z de cada punto medido, donde X e Y indican la posición del punto en el plano y Z la altura relativa del mismo respecto a la referencia, figura 2.

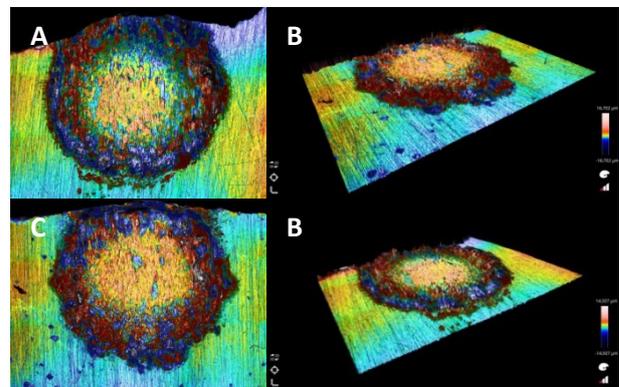


Figura 2. Resultados de la medición: (A) 2D probeta LP, (B) 3D probeta LP, (C) 2D probeta SP y (D) 3D probeta SP.

A partir de la imagen 2D y el listado de puntos medidos, se crean imágenes correspondientes a cortes paralelos a

la superficie. Para ello, se realiza una agrupación por alturas de los puntos medidos empleando el método de agrupamiento K-Means (MATLAB©). Este método divide las alturas medidas en k grupos y le asigna a cada una el índice del grupo cuyo valor medio es el más cercano. A continuación, se relacionan los puntos con alturas de mismo índice con los píxeles de la imagen 2D para crear k imágenes.

Según la altura relativa y de cómo se distribuyen los puntos en las distintas imágenes, se pueden identificar aquellas zonas que representan desgaste, zonas que no han sufrido modificación o incluso aquellas donde se ha añadido material. Para distinguir estas zonas se toma como referencia los puntos que se sitúan fuera de la zona de contacto porque en ningún momento han sido alterados. Con ellos se obtiene un plano medio de la superficie inalterada.

El objetivo de esta identificación es la creación de una imagen de las zonas que han sufrido desgaste y una imagen de las zonas inalteradas, figura 3. Las imágenes de las zonas desgastadas e inalteradas permiten delimitar las zonas de adhesión y contacto a partir de la agrupación de subconjuntos de las k imágenes.

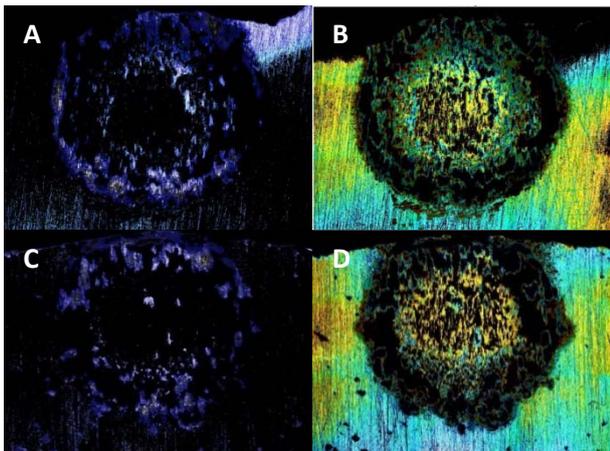


Figura 3. (A) Imagen zonas de desgaste de LP, (B) imagen zonas inalteradas de LP. (C) Imagen zonas de desgaste de SP, (D) zonas inalteradas de SP.

Para seleccionar los elementos de estas imágenes que ayudarán a ajustar las circunferencias correspondientes a las zonas de adhesión y contacto, y por tanto, obtener los radios y centros de ambas zonas, es necesario realizar la segmentación de las mismas mediante técnicas morfológicas de procesamiento de imágenes [4]. Estas técnicas se basan en la morfología matemática, teoría para el análisis y tratamiento de estructuras geométricas basada en operaciones de teoría de conjuntos. Las operaciones morfológicas simplifican imágenes y conservan las principales características de forma de los objetos.

El tratamiento de las imágenes comienza eliminando las pequeñas imperfecciones y puntos no deseados resultado de la agrupación de píxeles. Esto se realiza

aplicando a las imágenes anteriores (en blanco y negro) las operaciones morfológicas de reconstrucción por apertura y cierre que eliminan pequeños elementos y pequeños agujeros. La reconstrucción por apertura consiste en la combinación de la operación de erosión, que reduce los elementos de la imagen, y en una posterior reconstrucción, que recompone la imagen tomando como marcador la imagen erosionada, por lo que si un elemento ha sido eliminado tras la erosión, no aparecerá en la imagen reconstruida. Posteriormente se aplica la operación de reconstrucción por cierre, que consiste en invertir la imagen reconstruida por apertura, realizar el mismo proceso de erosión y reconstrucción y por último volver a invertir la imagen. En este caso, al realizar la erosión y la reconstrucción sobre la imagen invertida, los elementos que eliminamos equivalen a agujeros de la imagen no invertida [4].

Teniendo en cuenta que en la zona de contacto aparecen puntos que han sufrido desgaste o adhesión, para delimitarla se parte del complementario de la imagen de las zonas inalteradas binarizada. Se procesa la imagen ejecutando en primer lugar la operación morfológica de erosión que reduce los elementos de la imagen y a continuación se aplica la operación morfológica de reconstrucción por apertura para eliminar los elementos aislados. Una vez se dispone de una imagen segmentada con los elementos que han sufrido desgaste o adhesión, se procede a ajustar de forma iterativa una circunferencia que contenga los puntos de los elementos seleccionados, figura 4.

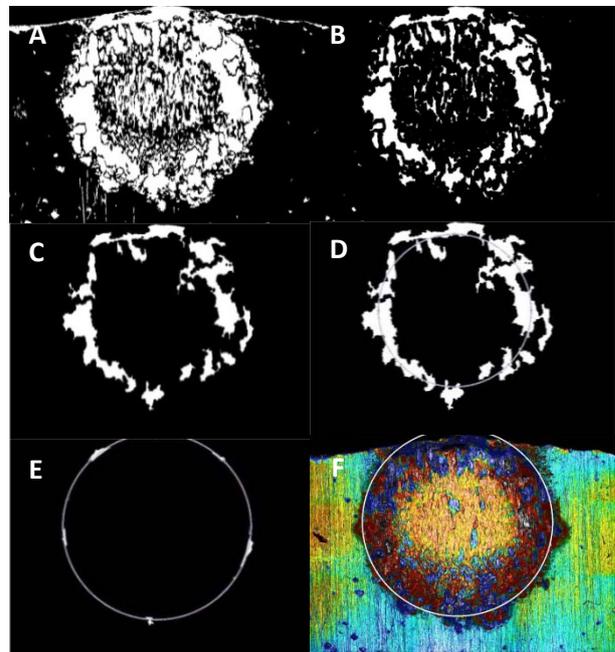


Figura 4. Proceso de ajuste a zona de contacto probeta SP: (A) imagen binarizada, (B) imagen tras erosión, (C) imagen tras reconstrucción por apertura, (D) primer ajuste a zona de contacto, (E) último ajuste a zona de contacto, (F) ajuste sobre imagen 2D.

Para delimitar la zona de adhesión, zona en la que se supone que no deben de aparecer puntos que han sufrido desgaste, se parte de la imagen de la zona de desgaste binarizada, delimitada por la zona de contacto. Mediante el mismo proceso de segmentación, se ajusta una circunferencia de forma iterativa de tal forma que en cada iteración los puntos de las zonas de desgaste contenidos en la circunferencia vayan disminuyendo, figura 5.

El proceso de segmentación para cada caso debe ajustarse variando el valor de los parámetros de las transformaciones morfológicas y el número de iteraciones para el ajuste. Los parámetros de las transformaciones morfológicas se ajustan en función de los elementos que se desean eliminar, dándole un valor más elevado conforme mayores son los elementos no deseados. El número de iteraciones se elige, tras el ajuste de los parámetros de las transformaciones morfológicas, realizando una prueba inicial y seleccionando posteriormente el número de iteraciones que mejor ajustan la circunferencia. Aunque las huellas presentan patrones parecidos, el proceso de ajuste de los parámetros de las operaciones morfológicas no se ha podido automatizar del todo debido a que los elementos que forman las imágenes son totalmente diferentes para cada caso. Una vez que todos los parámetros se han establecido, el proceso es automático, en cada iteración se ajusta una circunferencia y se eliminan los puntos no deseados para volver a realizar el ajuste en la siguiente iteración.

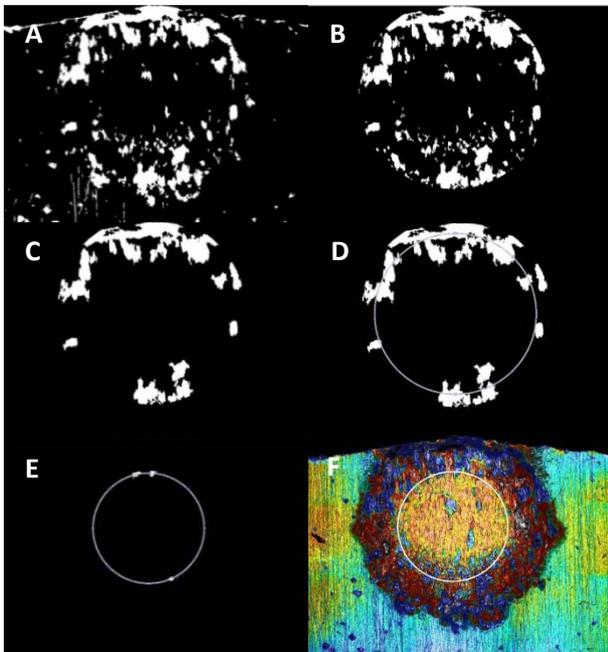


Figura 5. Proceso de ajuste a zona de adhesión probeta SP: (A) imagen binarizada, (B) imagen delimitada por zona de contacto, (C) imagen tras erosión y reconstrucción por apertura, (D) primer ajuste a zona de adhesión, (E) último ajuste a zona de adhesión, (F) ajuste sobre imagen 2D.

En la figura 6 se muestran las zonas de contacto y adhesión obtenidas de este proceso para ambas probetas. En los ajustes realizados se puede observar que ambas circunferencias no son concéntricas, figuras 6A y 6C, y que los valores obtenidos para la excentricidad, e , y radios de las zonas de adhesión, c , y contacto, a , son mayores que los calculados teóricamente [2], ver tabla 1. De acuerdo al apartado anterior, la excentricidad de la zona de adhesión es resultado de la tensión global oscilatoria en la probeta. Pero en los ajustes realizados aparece además una excentricidad horizontal de menor magnitud que al igual que las diferencias entre los valores teóricos y los valores obtenidos, se debe a que el contacto no es ideal y también a que el algoritmo y procesado de imágenes no es perfecto. Además, el coeficiente de rozamiento al principio del ensayo es más bajo, lo que provoca deslizamientos tanto globales como locales mayores, que alteran la huella resultante. En los cálculos realizados se ha empleado el valor del coeficiente de rozamiento una vez se ha estabilizado. Por último, se ha corregido la posición horizontal de la zona de adhesión, situándola de forma simétrica a la zona de contacto, figuras 6B y 6D.

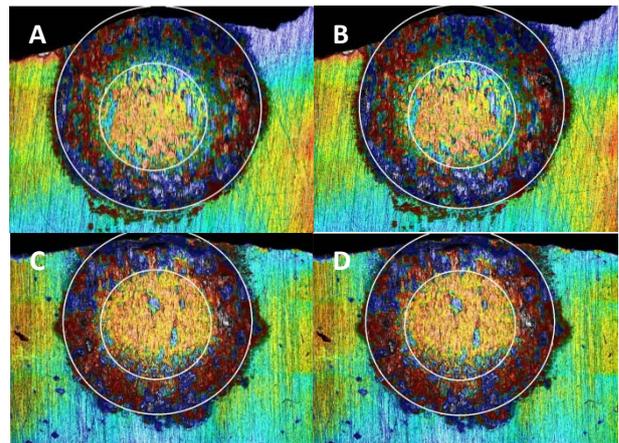


Figura 6. Ajustes obtenidos: (A) probeta LP, (B) probeta LP zona adhesión corregida, (C) probeta SP, (D) zona adhesión corregida.

Tabla 1. Comparación resultados

	LP	SP
$a_{\text{experimental}} (\mu\text{m})$	1604.5	1510.6
$a_{\text{teórico}} (\mu\text{m})$	1312.1	1234.8
$c_{\text{experimental}} (\mu\text{m})$	846.6	885.2
$c_{\text{teórico}} (\mu\text{m})$	811.0	777.9
$e_{\text{experimental}} (\mu\text{m})$	132.1	57.6
$e_{\text{teórico}} (\mu\text{m})$	140.6	172.0

MODELO DE DESGASTE

El modelo empleado para calcular el coeficiente de desgaste de las probetas ensayadas se basa en el modelo propuesto por Archard [5,6]. Se trata de un modelo sencillo que permite evaluar el desgaste que se produce por el movimiento relativo entre dos componentes en contacto.

El modelo considera el modo de desgaste adhesivo, es decir, el desgaste se produce tras la adhesión y posterior desplazamiento relativo de las asperezas de las superficies en contacto, y asume que estas asperezas son de forma hemisférica y se deforman plásticamente en contacto.

La ecuación formulada por Archard relaciona la tasa de desgaste W , volumen V eliminado por distancia de deslizamiento S , con la carga normal P , el coeficiente de desgaste adimensional K y la dureza de la superficie H de la siguiente forma:

$$W = \frac{V}{S} = K \frac{P}{H} \quad (1)$$

Aplicando la ecuación a nivel local [7], dividiendo por el área de contacto A :

$$\frac{V}{A} = K \frac{P_c S}{A H} \quad (2)$$

se obtiene:

$$h = \frac{K}{H} P_c S \quad (3)$$

donde h y P_c son, respectivamente, la profundidad de desgaste y la presión de contacto local, es decir, en cada punto. Dicha profundidad se obtiene como la diferencia entre la altura de cada punto y la del plano medio formado por los puntos fuera de la zona de contacto. La presión de contacto y la distancia de deslizamiento se pueden calcular teóricamente [8,9]. La distancia de deslizamiento, S , en cada punto será igual a 4 veces el número de ciclos del ensayo por el desplazamiento relativo entre los dos sólidos en dicho punto, $U_{relativo}$. Este desplazamiento relativo se puede calcular a partir de la distribución de tensiones tangenciales cuando se aplica la carga Q , calculada como la superposición de dos efectos, un deslizamiento global en todo el contacto y una distribución similar que impide el deslizamiento en la zona de adhesión, utilizando una perturbación del problema de Mindlin [10].

De esta forma, con la ecuación (3) y sabiendo la dureza del material, se puede calcular el coeficiente de desgaste K para cada punto de la zona de deslizamiento. En muchas ocasiones se emplea la relación K/H , conocida como coeficiente de desgaste dimensional o tasa de desgaste específica, que se empleará para comparar los resultados obtenidos con los resultados de otros ensayos publicados en la literatura.

$$\frac{K}{H} = \frac{h(x,y)}{P_c(x,y)N^4u_{relativo}(x,y)} = \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right] \quad (4)$$

Nótese que de todos los puntos introducidos en el modelo, solo se calculará el coeficiente de desgaste para los puntos que se encuentran dentro de la zona de deslizamiento, que es donde se tiene un S distinto de cero.

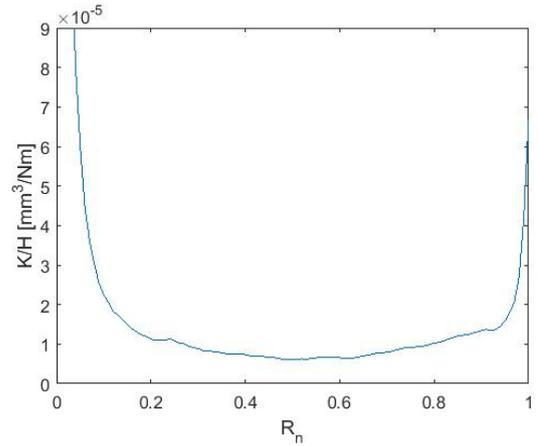


Figura 7. Parámetro K/H en la probeta LP.

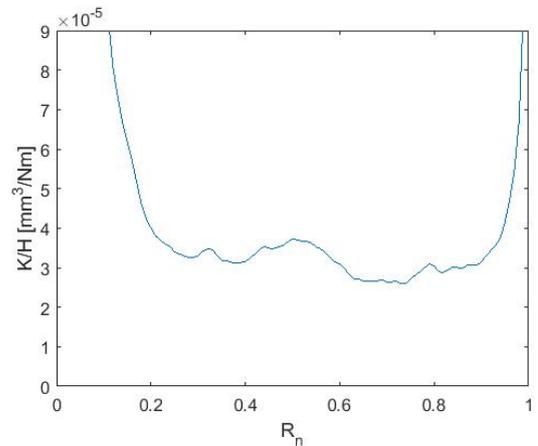


Figura 8. Parámetro K/H en la probeta SP.

En las gráficas 7 y 8 se muestra el coeficiente de desgaste obtenido en las dos probetas analizadas en función del radio normalizado R_n , que representa la distancia relativa del punto medido a los límites de las zonas de contacto y adhesión tomando como referencia el centro de la zona de adhesión, de tal forma que $R_n = 0$ se corresponde con la frontera de la zona de adhesión y $R_n = 1$ con el límite de la zona de contacto. El valor para cada R_n es el promedio de K/H en los 360° de la huella. En estas figuras se observa que en los extremos el parámetro de desgaste aumenta considerablemente, sin embargo en esas zonas el valor obtenido no es válido porque, o bien el deslizamiento tiende a cero ($R_n = 0$) o la presión tiende a cero ($R_n = 1$). Por lo tanto se puede decir que para la probeta tratada con Laser Peening el valor de K/H es aproximadamente $1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ mientras que en la de Shot Peening el valor es de $3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

Si se comparan los resultados obtenidos con otros trabajos de medición del desgaste para el mismo material, se encuentra que para ensayos “pin on disc” de muestras cilíndricas en contacto plano-plano, con velocidades de ensayo comprendidas entre 3.77-0.52 m/s y cargas comprendidas entre 20-60 N el coeficiente de desgaste dimensional medido varía entre 1.25×10^{-5} y $2.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ [11]. Para el mismo tipo de ensayo,

velocidades comprendidas entre 3.30-3.77 m/s y cargas comprendidas entre 15-25 N, el coeficiente de desgaste dimensional varía entre 4.912×10^{-5} y 6.876×10^{-5} mm³/Nm [12].

En los ensayos analizados en este artículo las condiciones eran muy distintas a las anteriores y además distintas en cada punto del contacto. Las velocidades y presiones de contacto varían desde 0 mm/s y 190 N/mm² para la probeta LP y 0 mm/s y 175 N/mm² para la probeta SP en puntos en la frontera de la zona de adhesión hasta 0.26 mm/s y 0 N/mm² para la probeta LP y 0.19 mm/s y 0 N/mm² para la probeta SP en la frontera de la zona de contacto.

Los ensayos de “pin on disc” son específicos para medir el desgaste mientras que los analizados en este artículo no lo son. En los primeros se mantiene constante la velocidad y deslizamiento en toda la superficie de contacto y la presión aproximadamente constante mientras que en los segundos cada punto del contacto está sometido a una velocidad, deslizamiento y presión distinta. Aun así se han obtenido unos resultados parecidos a los encontrados en la literatura.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado cómo se puede analizar el desgaste de una superficie a través del tratamiento de imágenes y la microscopía confocal, obteniéndose datos precisos para el análisis de huellas producidas por contacto.

A pesar de que el tipo de ensayo no es el indicado para la medición del desgaste, se ha podido obtener un valor aproximado del coeficiente de desgaste para rangos y combinaciones diferentes de velocidades y cargas. El tratamiento superficial previo y las combinaciones de carga normal y tensión global oscilatoria provocan un estado de tensiones superficiales diferente al que se produce en el ensayo “pin on disc”, y por tanto, podrían influir en los resultados obtenidos y explicar las diferencias encontradas. Sería necesario realizar más ensayos en las mismas condiciones para estudiar la repetitividad de los resultados y estudiar cómo influyen los diferentes parámetros del ensayo en los resultados obtenidos para poder aportar explicaciones concluyentes. Aun así, los resultados obtenidos son similares.

En los procesos de desgaste afectan más parámetros como la temperatura, oxidación, partículas de desgaste (tercer cuerpo) así como rangos de nivel carga y velocidad que determinan el tipo de desgaste (adhesivo, corrosivo, erosivo) y el nivel del mismo (desgaste leve/severo).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación del proyecto de investigación DPI2014-59160-P.

REFERENCIAS

- [1] R.B. Waterhouse, T.C. Lindley, Fretting Fatigue ESIS Publication 18. MEP, London, 1994.
- [2] J. Vázquez, Efecto de las tensiones residuales en la fatiga por fretting. Tesis, Universidad de Sevilla, 2010.
- [3] R. Artigas, Imaging Confocal Microscopy, en: Leach R. (eds) Optical Measurement of Surface Topography. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [4] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, S.L. Eddins, Digital Image Processing Using MATLAB, 2ª edición, Gatesmark Publishing, 2009.
- [5] J.F. Archard, Contact and rubbing of flat surface, *J. Appl. Phys.*, **24**, 981–988, 1953.
- [6] J.F. Archard, W. Hirst, The wear of metals under unlubricated conditions, *Proceedings of the Royal Society*, **A-236**, 397–410, 1956.
- [7] I.R. McColl, J. Ding, S.B. Leen, Finite element simulation and experimental validation of fretting wear, *Wear*, **256**, 1114–1127, 2004.
- [8] C. Navarro, Iniciación y crecimiento de grietas en fatiga por fretting, Tesis, Universidad de Sevilla, 2005.
- [9] C. Navarro, J. Domínguez, Contact conditions and stresses induced during fretting fatigue, *Computational Methods in Contact Mechanics IV*, pp. 453–462, Ed. WIT Press, 1999.
- [10] D.A. Hills, D. Nowell, A. Sackfield, *Mechanics of Elastic Contacts*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1993.
- [11] K.V. Sreenivasa Rao, Govindaraju. Sliding wear behavior of cast Al-7075 alloy reinforced with MgO particulates, *Materials Today: Proceedings*, **4**, 11096–11101, 2017.
- [12] Kalyan Kumar Singh, Saurabh Singh, Anil Kumar Shrivastava, Comparison of wear and friction behavior of aluminum matrix alloy (Al 7075) and silicon carbide based aluminum metal matrix composite under dry condition at different sliding distance, *Materials Today: Proceedings*, **4**, 8960–8970, 2017.