

Influencia del tiempo de nitruración en baño de sales en el comportamiento tribológico de un acero de herramientas AISI H13^(·)

G. Castro* y A. Fernández-Vicente*

Resumen

Se han investigado las características tribológicas a alta temperatura de un acero de herramientas para trabajo en caliente nitrurado en baño de sales *sursulf*. Se ha variado el tiempo de nitruración desde 1 hasta 24 h, para analizar su influencia en la microestructura obtenida y en el comportamiento frente al desgaste. Se han realizado ensayos de desgaste a alta temperatura y se ha evaluado la ratio de desgaste y el coeficiente de fricción. Se ha observado que el coeficiente de fricción no varía con el tiempo de nitruración y que la ratio de desgaste varía con la distancia de deslizamiento debido a la presencia de distintos mecanismos de desgaste, pero es independiente del tiempo de nitruración. Así, para distancias de ensayo cortas, los mecanismos de desgaste que contribuyen al desgaste total son deformación plástica y abrasión, mientras que para mayores distancias de deslizamiento los mecanismos observados son oxidación y abrasión.

Palabras clave

AISI H13. Desgaste. Nitruración *sursulf*. Capa blanca. Tribómetro *pin-on-disk*.

Influence of the salt-bath nitriding time on the wear behaviour of an AISI H13 tool steel

Abstract

Tribological high temperature characteristics of a H13 tool steel treated by salt bath have been studied. AISI H13 steel samples were nitrided by a *sursulf* bath, varying nitriding time from 1 to 24 h. Optical microscopy and micro-hardness deep profile through the nitrided layer were performed for each nitriding time. Standard pin-on-disk wear tests were conducted at high temperature. Sliding distance was varied from 150 m to 900 m. It has been observed that friction coefficient does not change with nitriding time and wear rate varies as a function of the sliding distance due to the presence of different wear mechanisms. For short sliding distances, the wear mechanisms that contribute to the total wear were plastic deformation and abrasion, whereas for greater sliding distances the mechanisms that control wear behaviour were oxidation and abrasion.

Keywords

AISI H13. Wear. *Sursulf* nitriding. Nitriding salt bath. Pin-on-disk tribometer.

1. INTRODUCCIÓN

En general, los moldes y matrices empleados en los procesos de conformado en caliente requieren una adecuada combinación de tenacidad y dureza superficial a las temperaturas de trabajo. Los materiales empleados tradicionalmente son aceros especiales (AISI H11 y H13), los cuales, bajo tratamientos térmicos adecuados, adquieren las características mecánicas necesarias a elevadas temperaturas^[1-3].

La nitruración es uno de los tratamientos termoquímicos de endurecimiento superficial más empleado por la industria para mejorar las características mecánicas de estos aceros. Consiste en introducir nitróge-

no en la superficie de materiales metálicos para mejorar su dureza superficial, resistencia al desgaste y a la corrosión, además de mejorar su resistencia a la fatiga térmica y mecánica. Durante el tratamiento de nitruración tienen lugar dos procesos: 1) conversión química superficial, que da lugar a la formación de una capa de combinación externa (o capa blanca), compuesta fundamentalmente de nitruros de hierro y 2) difusión del nitrógeno como solución sólida intersticial y precipitación de nitruros, a partir de los elementos de aleación^[4-7].

Una de las técnicas de nitruración más empleadas es la nitruración en baño de sales *sursulf*. Las ventajas que presenta esta técnica respecto a las de nitruración iónica o gaseosa son su relativa facilidad

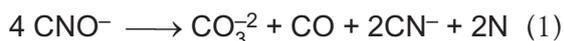
(·) Trabajo recibido el día 16 de octubre de 2006 y aceptado en su forma final el día de 17 de enero de 2007.

* Área de Materiales y Procesos de Fabricación, Centro Tecnológico AIMEN, C. Relva 27 A- Torneiros, 36410 Porriño, Pontevedra, Spain.

de operación y su bajo coste. Durante el proceso de nitruración *sursulf* el aporte de nitrógeno se consigue por la descomposición de los cianuros, contenidos en una sal básica, en cianatos. Mediante esta técnica se consiguen espesores considerables de capa de combinación y zona de difusión^[8 y 9].

Las reacciones básicas que tienen lugar en este tipo de nitruración son^[5, 9 y 10]:

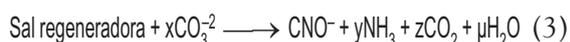
— Transformación de los cianatos contenidos en la sal básica.



— Oxidación de los cianatos.



— Reacción de los carbonatos de un compuesto orgánico (sal regeneradora) que vuelve a transformar, parcialmente, los carbonatos en cianatos y da lugar a la aparición de NH_3 .



La capa de combinación externa que se forma durante la nitruración en baño de sales influye, principalmente, en la resistencia al desgaste, en el comportamiento frente a la fricción y, en la resistencia a la corrosión^[11 y 12]. Sin embargo, existen opiniones divergentes acerca de si la presencia de dicha capa favorece o no la resistencia al desgaste en determinados procesos industriales, como es la forja. En general, se asume que un porcentaje de nitrógeno superior a 8,5 % da lugar a capas de combinación frágiles que disminuyen la resistencia al desgaste^[13].

En este trabajo se han estudiado las propiedades tribológicas a alta temperatura de un acero de herramientas para trabajo en caliente de la calidad 1.2344 (AISI H13) nitrurado en baño de sales *sursulf*. Para ello, se ha analizado la influencia del tiempo de nitruración en la microestructura obtenida y se ha determinado la influencia de la capa de combinación externa en el comportamiento frente al desgaste del acero nitrurado.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material empleado para el presente estudio fue un acero de herramientas para trabajo en caliente de calidad AISI H13, suministrado por la casa Uddeholm. La composición química del acero empleado es la siguiente: 0,39 % C; 1,0 % Si; 0,4 % Mn; 4,8 % Cr; 1,3 % Mo y 0,9 % V.

Para llevar a cabo el tratamiento térmico del acero, se cortaron probetas de 50 mm × 50 mm × 10 mm y se sometieron a un tratamiento de temple y reveni-

do. El tratamiento de temple se realizó en un horno de vacío mediante la siguiente secuencia de calentamiento: 650 °C, 850 °C y 1.025 °C. Las probetas se mantuvieron a 1.025 °C durante 2 h y se enfriaron con nitrógeno gas a 2 bares de presión, hasta alcanzar la temperatura ambiente. Seguidamente, se realizó el tratamiento de doble revenido en un horno con atmósfera de nitrógeno. Las temperaturas del primer y segundo revenido fueron de 580 °C y 620 °C, respectivamente. Finalmente, las probetas templadas y revenidas fueron nitruradas en un baño de sales *sursulf*.

Los tratamientos de nitruración se realizaron durante diferentes tiempos de mantenimiento, lo que permitió obtener distintos valores de espesor de zona nitrurada, capa de combinación y de dureza superficial. La temperatura del baño de sales fue de 590 °C.

Se llevó a cabo un análisis microestructural y se realizaron barridos de dureza en la sección transversal de cada una de las probetas nitruradas. En la figura 1 se muestran gráficamente los perfiles de dureza de las capas nitruradas en función del tiempo de nitruración empleado y de la distancia a la superficie externa.

Finalmente, se realizaron ensayos de desgaste en caliente mediante un tribómetro *pin-on-disk* sobre las probetas nitruradas. Se utilizó como pin una bola de alúmina de 4 mm de diámetro. Las condiciones de ensayo se indican en la tabla I. Previamente a la realización de los ensayos, las probetas nitruradas fueron cuidadosamente limpiadas mediante ultrasonidos en acetona durante 15 min. Todos los ensayos se

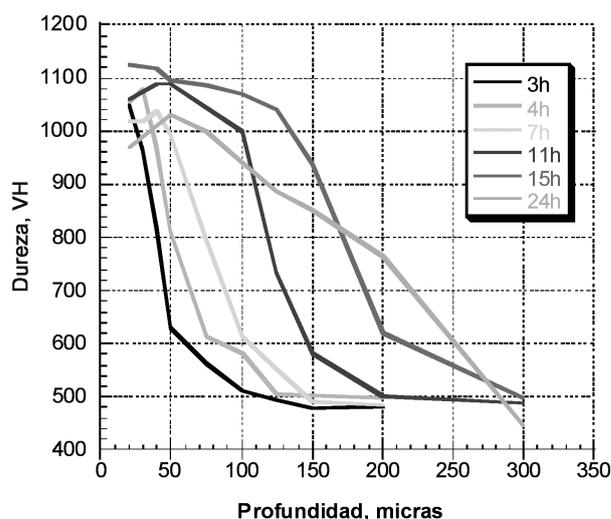


Figura 1. Variación del perfil de durezas en función del tiempo de nitruración *sursulf*.

Figure 1. Hardness profile variation as a function of nitriding time.

Tabla I. Condiciones generales de los ensayos de desgaste realizados mediante el tribómetro tipo pin-on-disk

Table I. General conditions of wear tests realized by a pin-on-disk tribometer

CONDICIONES ENSAYOS DE DESGASTE TIPO PIN-ON-DISK	
Carga	30 N
Velocidad lineal	0,25 m/s
Tiempo de ensayo	10 y 60 min
Distancia de deslizamiento	150 m y 900 m
Humedad relativa	30 %
Temperatura horno	500 °C
Temperatura disco*	220 °C -250 °C

* Este valor de temperatura se ha medido mediante una sonda de contacto tipo K sobre la superficie del disco antes de iniciar el ensayo de desgaste.

repetieron al menos tres veces bajo las mismas condiciones para asegurar la repetitividad de los resultados obtenidos.

Los valores de desgaste se obtuvieron mediante un perfilómetro de contacto Veeco, a partir de la medida del volumen de material perdido en cada ensayo, para lo cual se empleó la siguiente expresión [14 y 15]:

$$k = \Delta V / F_N L \quad (4)$$

siendo k el ratio de desgaste específico ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), ΔV la pérdida de volumen de la probeta (mm^3), F_N la fuerza normal aplicada en el contacto (N) y L la distancia de deslizamiento durante el ensayo (m). El volumen perdido se midió al finalizar cada ensayo y no de forma continua a lo largo del mismo.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 2 se muestra la microestructura correspondiente al corte transversal de una probeta de acero AISI H13 nitrurado en baño de sales *sursulf* durante 24 horas. Se observa que la microestructura obtenida está formada por un núcleo interno de martensita revenida y una capa nitrurada externa de unas 250 μm de espesor. La capa de nitruración, a su vez, está formada por una zona de difusión de nitrógeno y una capa blanca en la parte externa con un espesor aproximado de 15 μm . La microestructura de la zona de difusión está formada por una matriz de martensita revenida con finas placas de nitruros.

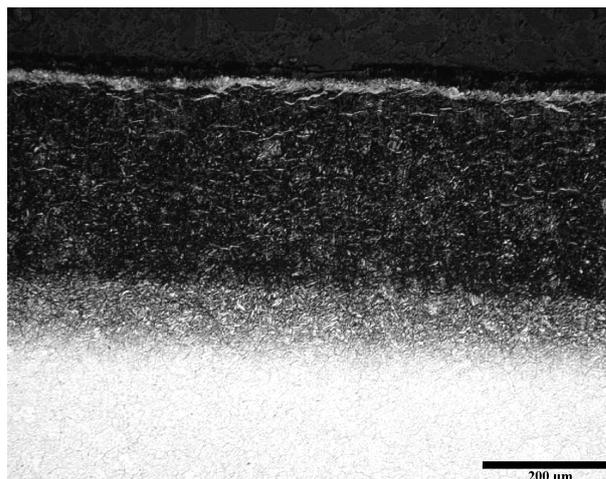


Figura 2. Microestructura del acero AISI H13 tratado mediante nitruración sursulf durante 24 h.

Figure 2. Microstructure of an AISI H13 steel treated by sursulf nitriding during 24 h.

En la figura 3 se muestra la microestructura correspondiente al corte transversal de una probeta de acero AISI H13 nitrurado en baño de sales *sursulf* durante 1 hora. Se observa que la microestructura obtenida está formada por un núcleo interno de martensita revenida y una capa nitrurada externa de un espesor aproximado de 60 μm . La capa de nitruración está formada por una zona de difusión de nitrógeno sin capa blanca. La microestructura de la zona de difusión está formada por una matriz de martensita revenida con nitruros de pequeño tamaño.

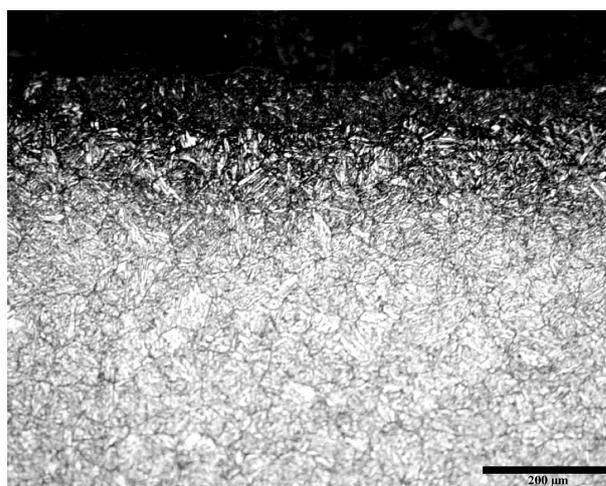


Figura 3. Microestructura del acero AISI H13 tratado mediante nitruración sursulf durante 1 h.

Figure 3. Microstructure of an AISI H13 steel treated by sursulf nitriding during 1 h.

En general, se observó que todas las probetas tratadas mediante nitruración *sursulf* durante tiempos superiores a 7 h, presentaron una capa de combinación externa (capa blanca), tal y como se observa en la figura 2. Mientras que para tiempos de nitruración inferiores a 7 h, se obtuvo una capa de combinación irregular y de poco espesor, junto con zonas en las que únicamente se observó una zona de difusión, tal y como se observa en la figura 3.

En la figura 4 se muestra la variación del coeficiente de fricción en función del tiempo de ensayo de las probetas nitruradas durante 1, 4, 7, 11, 15 y 24 h. En general, se observa un aumento del coeficiente de fricción en la parte inicial de la gráfica hasta alcanzar un valor prácticamente constante, en torno a 0,5, para todos los casos.

En la figura 5 se representa gráficamente la variación del ratio específico de desgaste, k , frente al tiempo de nitruración y en función de la distancia de deslizamiento. En general, se observa una diferencia en el comportamiento frente al desgaste en función de la distancia de deslizamiento evaluada. Así, para distancias de deslizamiento cortas, 150 m, se observa un aumento del volumen perdido, a medida que aumenta el tiempo de nitruración hasta 7 h, momento a partir del cual el volumen perdido se puede considerar constante.

Por otro lado, para distancias de deslizamiento largas, 900 m, se observa que el volumen perdido se mantiene prácticamente constante hasta un tiempo

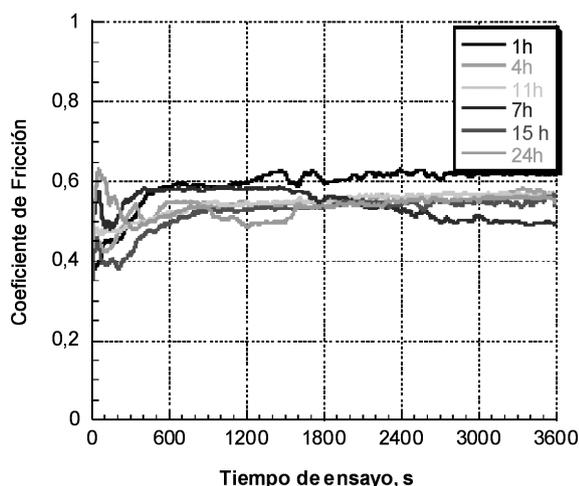


Figura 4. Gráfica del coeficiente de fricción frente al tiempo de los ensayos de desgaste realizados en el acero AISI H13 nitrurado en baño de sales sursulf durante 1, 4, 7, 11, 15 y 24 h.

Figure 4. Plot of the friction coefficient versus time for an AISI H13 steel nitrided in a sursulf salt bath during 1, 4, 7, 11, 15 and 24 h.

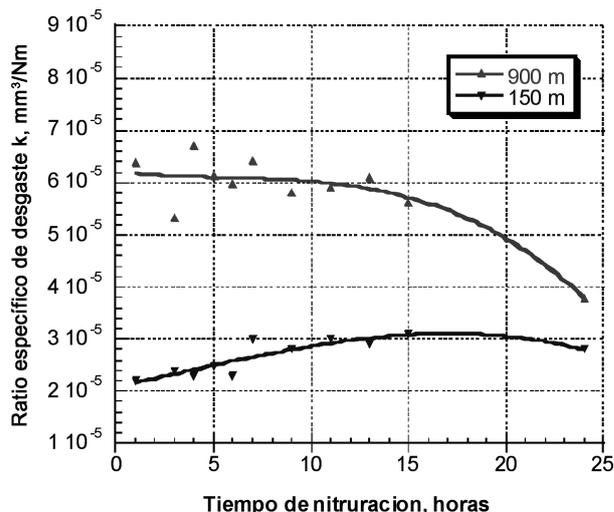


Figura 5. Variación del ratio específico de desgaste en función del tiempo de nitruración.

Figure 5. Variation of the specific wear rate as a function of the nitriding time.

de 13 h de nitruración. Seguidamente, el volumen perdido por desgaste disminuye considerablemente con el aumento del tiempo de nitruración, hasta alcanzar un valor de $k = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, para 24 h.

En la figura 6 se representa gráficamente la variación de la ratio específica de desgaste, k , frente a la distancia de deslizamiento y en función del tiempo de nitruración. Se observan dos zonas, claramente diferenciadas, para todos los tiempos de nitruración evaluados. Por un lado, en la parte inicial de la gráfica, para valo-

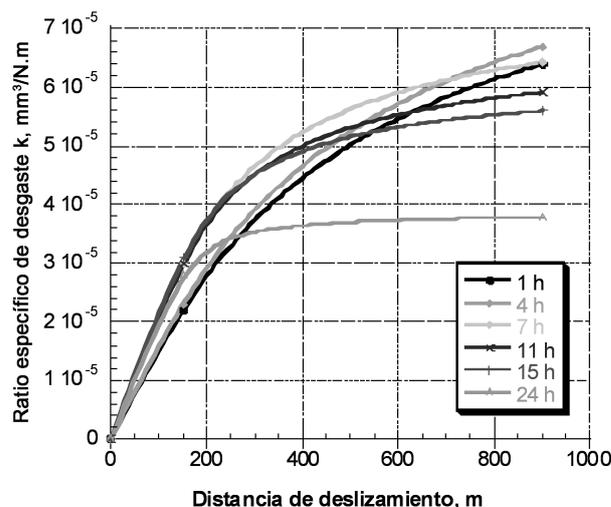


Figura 6. Variación de la ratio específica de desgaste en función de la distancia de deslizamiento.

Figure 6. Variation of the specific wear rate as a function of the sliding distance.

res de la distancia de deslizamiento inferiores a 200 m, los valores de la ratio de desgaste específico varían entre $2,1 \cdot 10^{-5}$ y $3 \cdot 10^{-5}$. Por otro lado, para distancias de deslizamiento mayores de 200 m la ratio de desgaste aumenta significativamente, alcanzado en algunos casos valores de hasta el doble de los obtenidos para una distancia de deslizamiento de 200 m.

El cambio de pendiente, que se observa en las curvas del ratio de desgaste de la figura 6, en función de la distancia de deslizamiento, se corresponde con la disminución de la velocidad de desgaste. En general, el mayor valor de la velocidad de desgaste encontrado en la parte inicial de la gráfica se corresponde con la zona de desgaste inicial o *running-in* [17 y 18].

En las figuras 7 y 8 se muestra la superficie desgastada de las probetas nitruradas durante 1 y 24 h, respectivamente, y ensayadas hasta una distancia de deslizamiento de 150 m. Se observa que en la superficie desgastada de la probeta nitrurada durante 1 h aparecen surcos de abrasión y zonas deformadas plásticamente en la dirección de deslizamiento, junto con las líneas de rectificado del material base. Mientras que en la probeta nitrurada durante 24 h se observa una superficie deformada más lisa y homogénea, con pequeños surcos de abrasión.

En las figuras 9 y 10, se muestra la superficie desgastada de las probetas nitruradas durante 1 y 24 h, respectivamente, y ensayadas hasta una distancia de deslizamiento de 900 m. Se observa que la superficie desgastada de la probeta nitrurada durante 1 h presenta numerosos surcos de abrasión, mientras que en la superficie de la probeta tratada durante 24 h

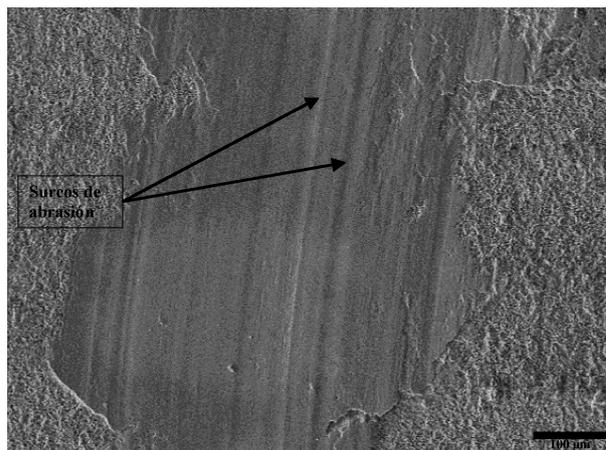


Figura 8. Superficie desgastada de un acero AISI H13 nitrurado durante 24 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 150 m.

Figure 8. Wear surface of an AISI H13 steel nitrurated during 24 h and wear tested until a sliding distance of 150 m.

los surcos de abrasión son más pequeños y, en general, la superficie es más lisa.

4. DISCUSIÓN

El aumento inicial del coeficiente de fricción, que se observa en todas las probetas ensayadas (Fig. 4), puede explicarse teniendo en cuenta la rugosidad que

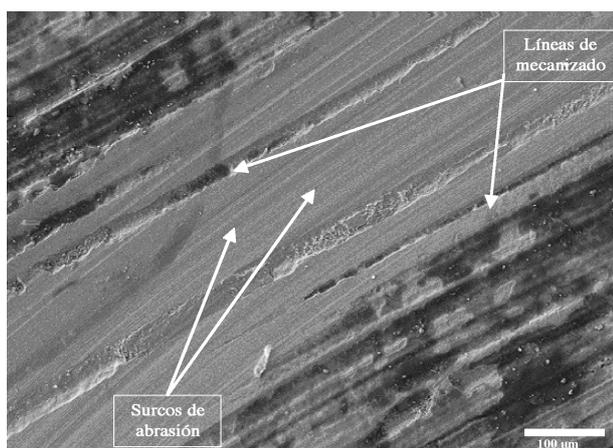


Figura 7. Superficie desgastada de un acero AISI H13 nitrurado durante 1 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 150 m.

Figure 7. Wear surface of an AISI H13 steel nitrurated during 1 h and wear tested until a sliding distance of 150 m.

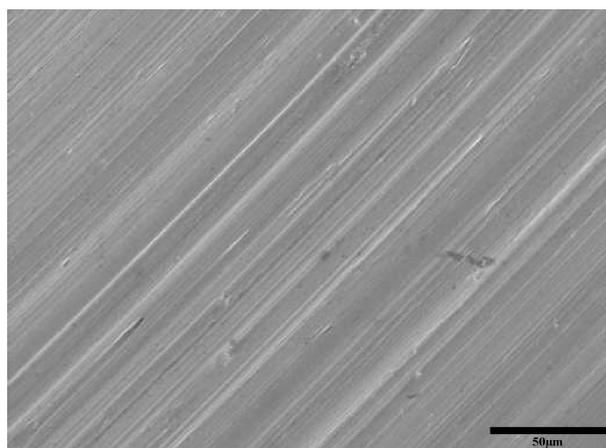


Figura 9. Superficie desgastada de un acero AISI H13 nitrurado durante 1 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 900 m.

Figure 9. Wear surface of an AISI H13 steel nitrurated during 1 h and tested until a sliding distance of 900 m.

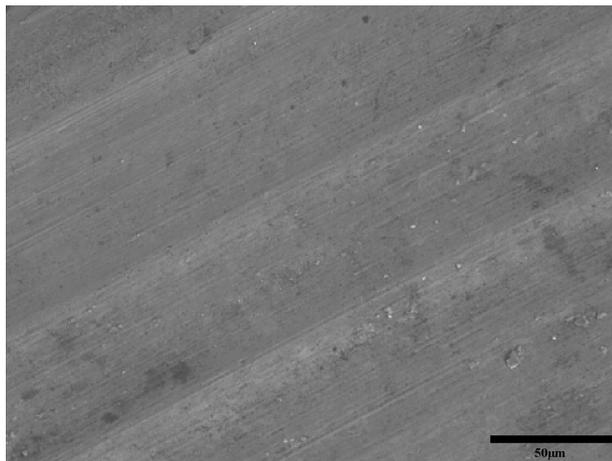


Figura 10. Superficie desgastada de un acero AISI H13 nitrurado durante 24 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 900 m.

Figure 10. Wear surface of an AISI H13 steel nitrided during 24 h and wear tested until a sliding distance of 900 m.

presenta la superficie exterior de las probetas nitruradas. Este valor de rugosidad dificulta el contacto entre el pin y el disco, de tal forma que el área real de contacto es menor que el área aparente de contacto, lo que conduce a valores bajos del coeficiente de fricción. A medida que avanza el ensayo, disminuye la rugosidad superficial de los materiales, lo que conlleva al aumento del número de puntos de contacto y, con ello, al aumento del coeficiente de fricción [19 y 20]. Para tiempos de ensayo mayores de 500 segundos, el número de puntos de contacto entre el pin y el disco permanece prácticamente constante y el coeficiente de fricción alcanza la zona estacionaria.

La diferencia de comportamiento que experimenta la ratio específica de desgaste, k , en función del tiempo de nitruración para las distancias de deslizamiento ensayadas, 150 y 900 m (Fig. 5), se puede entender considerando los siguientes aspectos: 1) la presencia o no de capa blanca y 2) el perfil de dureza obtenido para cada tiempo de nitruración.

Así, para distancias de deslizamiento cortas, 150 m, se observa un aumento del volumen perdido, a medida que aumenta el tiempo de nitruración. Este comportamiento puede deberse a la formación de una capa de combinación frágil e irregular que, durante los ensayos de desgaste, se rompe generando partículas pequeñas de elevada dureza que permanecen en la zona del contacto entre el pin y el disco y dan lugar a un aumento del volumen perdido.

Por otro lado, para distancias de deslizamiento elevadas (900 m) se observa que la ratio de desgaste obtenida es similar para todas las probetas que han si-

do nitruradas durante tiempos inferiores a 13 h. A medida que aumenta el tiempo de nitruración disminuye la ratio específica de desgaste. Este comportamiento se atribuye al aumento del espesor de la zona de difusión con el aumento del tiempo de nitruración. Al aumentar el espesor de la zona de difusión aumenta también el perfil de dureza de las capas nitruradas (Fig. 1), lo que conlleva a una reducción del volumen perdido durante el ensayo. Por otro lado, se observa que el efecto de la capa blanca en la ratio específica de desgaste desaparece como consecuencia del aumento del desgaste con el aumento de la distancia de deslizamiento. Estos resultados están de acuerdo con trabajos previos en los que se indica que el comportamiento frente al desgaste no depende tanto de la dureza de la capa de combinación externa, sino de la dureza de la región próxima a la superficie^[16].

En resumen, para tiempos de ensayo cortos, el valor del coeficiente de desgaste está controlado por la calidad y la presencia de capa blanca en la superficie exterior de la capa nitrurada, mientras que para tiempos de ensayo más largos, el coeficiente de desgaste está controlado por el perfil de durezas de la zona de difusión.

La variación en el comportamiento del ratio de desgaste, k , en función de la distancia de deslizamiento (Fig. 6) se atribuye a la variación en el mecanismo de desgaste. Para analizar cada uno de los mecanismos de desgaste que ocurren en función de la distancia de deslizamiento, se realizó microscopía electrónica de barrido en las superficies de las huellas desgastadas (Figs. 7 y 10).

Así, para entender el comportamiento frente al desgaste para distancias de deslizamiento cortas (Figs. 7 y 8) es necesario tener en cuenta que, inicialmente, la presión aplicada sobre la superficie del disco es muy alta. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, la rugosidad inicial dificulta el contacto y éste únicamente tiene lugar entre los picos de las líneas de mecanizado del disco y el pin. Debido a esta presión tan alta se produce la deformación plástica de parte del material de los picos en la dirección de deslizamiento y el arrancamiento de partículas. El material deformado y arrancado se acumula y compacta en las zonas de los valles de las líneas de mecanizado, tal y como se observa en la figura 11, y forma una superficie de desgaste homogénea.

Durante el ensayo de desgaste, no todo el material deformado y arrancado de la superficie del disco se compacta formando una superficie más homogénea, sino que parte de las partículas arrancadas permanecen en la zona de contacto entre pin y disco, dando lugar a los típicos surcos de abrasión en la dirección de deslizamiento (Fig. 11). Por tanto, para distancias

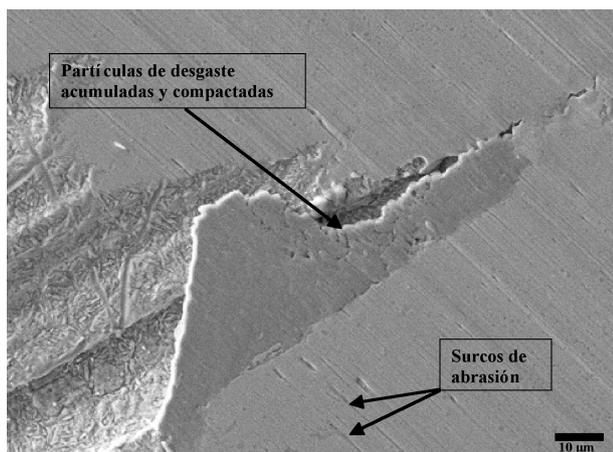


Figura 11. Material deformado plásticamente en la superficie de desgaste de un acero AISI H13 nitrurado en baño de sales *sursulf* durante 1 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 150 m.

Figure 11. Plastically deformed material in the wear surface of an AISI H13 steel nitrated in sursulf salt bath during 1 h and tested during a sliding distance of 150 m.

de deslizamiento cortas tiene lugar una contribución de dos mecanismos de desgaste, a saber: deformación plástica y abrasión.

Para distancias de deslizamiento mayores de 200 m, se produce una transición en el mecanismo de desgaste y el coeficiente específico de desgaste, k , aumenta significativamente por encima del doble de los valores obtenidos a distancias menores de 200 m. En este caso, los mecanismos de desgaste encontrados son abrasión y oxidación. La variación en los valores del coeficiente específico de desgaste en función del tiempo de nitruración puede deberse a tres factores: 1) variación de la rugosidad superficial inicial de las probetas nitruradas, 2) profundidad de la capa nitrurada y 3) la formación y mantenimiento de una capa de óxidos sobre la superficie desgastada.

En general, la cantidad y tamaño de las partículas de desgaste depende de la topografía superficial [21]. Algunos trabajos de la literatura [20 y 22] muestran una reducción en el coeficiente de fricción y desgaste a medida que disminuye la rugosidad superficial. Así la probeta tratada durante 1 h, cuyo valor de rugosidad es ligeramente superior a $3 \mu\text{m}$, presenta un valor de desgaste mucho mayor que la probeta tratada durante 24 h, cuyo valor de rugosidad es de, aproximadamente, $1 \mu\text{m}$. Valores elevados de la rugosidad superficial, favorecen el aumento de la cantidad de partículas que permanecen en la zona de contacto y que originan desgaste abrasivo.

Por otro lado, se observa (Fig. 1) que para las profundidades de huella obtenidas ($30\text{-}40 \mu\text{m}$) durante los ensayos de desgaste hasta 900 m, el valor de dureza de la probeta nitrurada durante 1 h es considerablemente menor que el valor de dureza obtenido en la probeta nitrurada durante 24 h. Esto favorece el desgaste de la superficie más blanda debido a la acción abrasiva de las partículas duras de desgaste procedentes de la capa nitrurada.

En la figura 12 se muestra el espectro de dispersión de energías realizado en una zona amplia de la superficie desgastada de la probeta nitrurada durante 24 h y ensayada durante 900 m. Se observa que los picos obtenidos se corresponden con los elementos químicos que forman parte de la composición del material, además de un pequeño pico de nitrógeno y un gran pico de oxígeno. En las figuras 13 a) y 13 b) se muestra la superficie de la probeta nitrurada durante 1 h y desgastada durante 900 m y el espectro de dispersión de energías obtenido mediante EDS, respectivamente. Se observa la presencia de pequeñas partículas oxidadas sobre la superficie desgastada (*spectrum 1*). Por otro lado, el espectro realizado en la superficie de la huella de desgaste de la muestra nitrurada durante 1 h (*spectrum 2*) muestra un menor contenido de oxígeno, que el realizado en la probeta nitrurada durante 24 h.

En general, la formación y mantenimiento de una capa de óxidos sobre las superficies desgastadas (como en el caso de las probetas nitruradas durante 24 h), favorece el aumento de la resistencia frente al desgaste y conduce a menores valores del coeficiente de desgaste [23 y 24]. En el caso de la probeta nitrurada durante 1 h no se forma una capa continua de óxidos

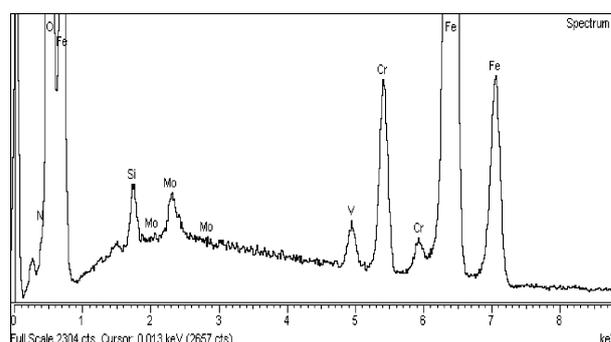


Figura 12. Espectro de dispersión de energías obtenido en la superficie de desgaste de un acero AISI H13 nitrurado durante 24 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 900 m.

Figure 12. Electron Dispersion Spectroscopy (EDS) obtained in the wear surface of an AISI H13 steel nitrated during 24 h and wear tested until a sliding distance of 900 m.

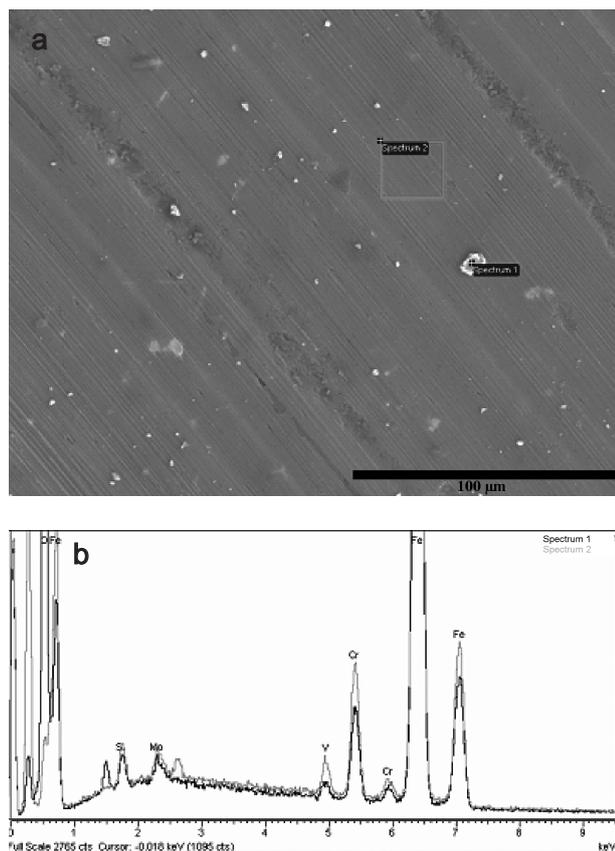


Figura 13. a) Superficie desgastada de un acero AISI H13 nitrurado durante 1 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 900 m. b). Espectro de dispersión de energías de la superficie desgastada de un acero AISI H13 nitrurado durante 1 h y ensayado hasta una distancia de deslizamiento de 900 m.

Figure 13 a). Wear surface of an AISI H13 steel nitrided during 1 h and wear tested during a sliding distance of 900 m. b) Electron Dispersion Spectroscopy (EDS) obtained in the wear surface of an AISI H13 steel nitrided during 1 hour and wear tested until a sliding distance of 900 m.

durante el ensayo de desgaste y la capa de oxidación inicial, resultado del mantenimiento a elevada temperatura durante el tratamiento de nitruración, se rompe en partículas de menor tamaño. Estas partículas oxidadas de elevada dureza favorecen el aumento del desgaste abrasivo.

Por tanto, puede decirse que para mayores distancias de deslizamiento también tiene lugar una combinación de dos mecanismos de desgaste, pero en este caso estos mecanismos son: abrasivo y oxidativo.

En resumen, para tiempos de deslizamiento pequeños tiene lugar una combinación de dos mecanismos de desgaste, deformación plástica y abrasión.

Mientras que para mayores distancias de deslizamiento, los mecanismos de desgaste presentes son oxidación y abrasión.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han evaluado y comparado las propiedades tribológicas a alta temperatura de un acero de herramientas para trabajo en caliente de la calidad 1.2344 (AISI H13) nitrurado en baño de sales *sur-sulf*. Se ha analizado la influencia del tiempo de nitruración en la microestructura y se ha determinado la influencia de la zona de difusión y de la capa de combinación externa en el comportamiento frente al desgaste de los aceros nitrurados. Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El coeficiente de fricción obtenido en los ensayos de desgaste aumenta hasta alcanzar un valor prácticamente constante en torno a 0,5, para todos los tiempos de nitruración empleados.
- La ratio de desgaste disminuye a medida que aumenta el tiempo de nitruración, para distancias de deslizamiento elevadas, debido al aumento de la profundidad del perfil de durezas de la capa nitrurada.
- Para distancias de deslizamiento cortas, la ratio de desgaste aumenta a medida que aumenta el tiempo de nitruración hasta alcanzar 7 h de nitruración, momento a partir del cual se mantiene prácticamente constante. Esto se debe a la aparición de una capa blanca porosa y con numerosas grietas, que se rompe dando lugar a partículas duras que favorecen el aumento del desgaste.
- La velocidad de desgaste varía en función de la distancia de deslizamiento debido a la presencia de distintos mecanismos de desgaste. Así, para distancias cortas los principales mecanismos de desgaste que contribuyen al desgaste total son la deformación plástica y la abrasión, mientras que para mayores distancias de deslizamiento los mecanismos presentes en la superficie desgastada son oxidación y abrasión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. BAHRAMI, S.H. MOUSAVI-ANIJDAN, M.A. GOLOZAR, M. SHAMANIAN Y N. VARAHRAM, *Wear* 258 (2005) 846-851.
- [2] O. BARRAU, C. BOHER, R. GRAS Y F. REZAI-ARIA, *Wear* 255 (2003) 1.444-1.454.

- [3] C. VERGNE, C. BOHER, C. LEVAILLANT Y R. GRAS, *Wear* 250 (2001) 322-333.
- [4] S. LI, R.R. MANORY, *J. Mater. Sci.* 34 (1999) 1.045-1.051.
- [5] "Liquid Nitriding" *Heat Treating ASM Handbook*, Vol. 4, 1991, pp. 410-419,.
- [6] J. APRAIZ, *Tratamientos Térmicos de los Aceros*, Ed. Dossat, 1985.
- [7] A. J. MARCEL Y T. CHRISTIANSEN, *J. Phase Equilibria Diffusion* 26 (2005) 520-528.
- [8] M.A. MARTÍNEZ, *Moldes* 77 (2005) 41-49.
- [9] D. ALVAREZ, *Deformación Metálica* 95 (1984) 40-48.
- [10] D. PYE, *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing*, ASM International, 2005.
- [11] J. BARANOWSKA Y K. SZCZECINSKI, *Surf. Coat. Technol.* 180-181 (2004) 97-101.
- [12] A. ÇELİK, M. KARAKAN, A. ALSARAN Y I. EFEOGLU, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2005) 1.926-1.932.
- [13] D. PYE, *Proc. 6th Int. Aluminum Extrusion Technology Seminar*, Chicago, Illinois, 1996.
- [14] D-H. HWANG Y K-H. ZUM-GAHR, *Wear* 254 (2003) 365-375.
- [15] S. DIZDAR, *Wear* 237 (2000) 205-210.
- [16] M. B. KARAMIS Y E. GERCEKCIOGHU, *Wear* 243 (2000) 76-84.
- [17] T. RAJNESH, S.K. NATH Y S. RAY, *Metall. Mater. Trans. A* 33 (2002) 3.479-3.488.
- [18] Y.C. LIN, S.W. WANGM Y T.M. CHEN, *J. Mater. Proces. Technol.* 120 (2002) 126-132.
- [19] G. CASTRO, A. FERNÁNDEZ-VICENTE Y M.A. MARTÍNEZ, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 212-219.
- [20] K. KATO, *Wear* 241 (2000) 151-157.
- [21] I. SHERRINGTON Y P. HAYHURST, *Wear* 249 (2001) 182-187.
- [22] M.A. SHERBINEY Y J. HALLING, *Wear* 45 (1977) 211-220.
- [23] R. TYAGI, S.K. NATH Y S. RAY, *Metall. Mater. Trans. A* 33 (2002) 3.479-3.488.
- [24] P. PSYLLAKI, G. KEFALONIKAS, G. PANTAZOPOULOS, S. ANTONIOU Y J. SIDERIS, *Surf. Coat. Technol.* 162 (2002) 67-78.