

INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL SOBRE LAS PRESTACIONES FRENTE AL DESGASTE Y LA FATIGA DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075.

D. González, M. Brizuela, G. Atxaga, A. M. Irisarri y B. Zamorano

INASMET – Tecnalía, Mikeletegi Pasealekua 2, 20009 San Sebastián.

Resumen. En este trabajo se analiza el efecto ejercido por tres tipos de recubrimientos superficiales sobre las prestaciones frente al desgaste y la fatiga de una aleación de aluminio 7075, en estado T6, solubilización y maduración al pico de máxima resistencia. Los recubrimientos analizados fueron la deposición mediante la técnica de PVD de una capa de bisulfuro de molibdeno dopada con carburo de wolframio, un tratamiento Nituff® que consiste en un anodizado duro con partículas de polímero PTFE y un tratamiento de níquel químico con deposición de dos capas de níquel – 12% fósforo, la segunda de ellas impregnada con partículas de PTFE. El recubrimiento con bisulfuro de molibdeno dopado con carburo de wolframio conduce a un excelente comportamiento frente al desgaste, aunque la resistencia frente a la fatiga es inferior a la del material desnudo. El recubrimiento con níquel químico con partículas de PTFE presenta unas buenas prestaciones frente al desgaste pero su comportamiento frente a la fatiga es muy pobre. Finalmente, las probetas recubiertas con anodizado duro muestran un acentuado desgaste, razón por la cual no se prosiguió en su estudio.

Abstract. This paper analyses the wear and fatigue behaviour of an aluminium alloy 7075 in the solution treated and peak aged (T6) condition protected with three different coatings. These coatings were molybdenum disulphide and tungsten carbide deposited by PVD, hard anodising with PTFE particles and electroless nickel phosphorous coating with PTFE. Molybdenum disulphide and tungsten carbide yielded excellent wear behaviour although a decrease in the fatigue performance compared with the base material was observed. Electroless nickel coated specimens offered good wear behaviour but a very low fatigue life was obtained. Finally, specimens coated by the hard anodising process exhibited a marked wear loss, discarding further study.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una parte de los resultados que se han obtenido en el proyecto titulado “Análisis del Comportamiento de Recubrimientos aplicados a Aleaciones de Aluminio sometidos a Fatiga por Fretting”. Este proyecto ha sido realizado de forma conjunta por la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA) e INASMET – Tecnalía, dentro del Programa de Fomento de Investigación Técnica (PROFIT).

La fatiga por fretting constituye un fenómeno que puede aparecer en las superficies de contacto de los elementos unidos bajo presión y cuyas superficies se hallan sometidas a unos desplazamientos relativos micrométricos, normalmente como consecuencia de las cargas cíclicas que soportan. El resultado de esta combinación de efectos es la aparición de numerosas grietas en la zona de contacto que crecen de distinta forma, dependiendo de las condiciones generales de carga, pudiendo llegar hasta la fractura final del elemento [1]. No es el objetivo del presente trabajo entrar a describir este fenómeno sino resaltar el gran número de elementos y componentes que pueden sufrir un fallo de este tipo y la importancia industrial del mismo.

Si conviene recalcar que uno de los factores que más influyen sobre la mayor o menor resistencia frente a este tipo de solicitaciones es el estado superficial del material de que se trate: coeficiente de rozamiento entre las superficies, resistencia superficial a fatiga y a desgaste, espesor de la capa superficial, tensiones residuales en la proximidad de la superficie, etc. De hecho, uno de los caminos propuestos para mejorar las prestaciones en servicio de los componentes que se hallan sometidos a fatiga por fretting consiste en la aplicación de diversos recubrimientos o tratamientos superficiales, que induzcan tensiones de compresión en la periferia de las piezas o mejoren su capacidad para poder absorber los movimientos relativos entre las superficies que se hallan en contacto.

Las modificaciones de las superficies que se emplean para combatir el fenómeno de la fatiga por fretting se pueden clasificar en tres grupos; los tratamientos mecánicos, los tratamientos termoquímicos y los recubrimientos. Dentro del primer grupo destaca el shot peening. La principal mejora en las prestaciones de las aleaciones de aluminio se debe a la generación de tensiones residuales de compresión en la periferia del componente, en tanto que el beneficio que supone el incremento de la rugosidad superficial se califica de ligero [2]. Este proceso también se ha aplicado con éxito en aleaciones de titanio. Sin embargo, en el caso de las aleaciones de aluminio la facilidad con

que se produce el alivio de las tensiones de compresión, a temperaturas relativamente bajas, constituye la mayor limitación del método. Por este motivo, su uso no resulta efectivo en aquellos componentes que operan de forma prolongada en estas condiciones. También la aplicación de sobrecargas, que ejercen un efecto beneficioso sobre la vida a fatiga de los materiales, al generar una zona plástica de mayor tamaño en el extremo de la grieta, promoviendo la detención o, al menos, el retardo en su progresión, pueden resultar contraproducentes en los componentes sometidos a shot peening, al reducir la efectividad de las tensiones residuales de compresión que induce este tratamiento.

El tratamiento termoquímico de nitruración eleva de forma notable las prestaciones de los aceros frente a la fatiga por fretting, gracias a la generación de unas tensiones residuales de compresión en la superficie del componente. En el caso de la cementación no es tan evidente que se consiga un beneficio puesto que, aunque aumentan la resistencia y la dureza de la capa superficial, pueden generarse, incluso, tensiones de tracción, con la consiguiente merma en la resistencia a fatiga. Parece lógico esperar que en el caso de las aleaciones de aluminio se produzca un efecto similar al observado en los aceros por la introducción de nitrógeno en la red del aluminio. En este caso, las temperaturas a las que se realiza este tratamiento son, generalmente, más altas que las de operación del componente por lo que no se debe temer una pérdida de eficiencia en servicio. Sin embargo, precisamente por las condiciones en que se aplica el tratamiento, éste puede alterar la microestructura de la aleación y sus propiedades. Por este motivo, conviene efectuar un análisis de los posibles efectos que pueden surgir como consecuencia de la nitruración antes de pasar a su aplicación.

Se han empleado tanto recubrimientos blandos como duros para reducir la fatiga por fretting. No obstante, se debe recalcar que existe una fuerte controversia en la valoración del comportamiento en servicio de estos recubrimientos. Se ha señalado que la introducción de lubricantes que reduzcan el coeficiente de fricción entre las superficies constituye un buen paliativo para reducir el efecto dañino de la fatiga por fretting. En este el uso de politetrafluoretileno (más conocido por sus iniciales en inglés de PTFE) o de bisulfuro de molibdeno mejoran las prestaciones de una aleación de aluminio 2014 frente a la fatiga por fretting, siendo especialmente efectivos cuando van acompañados de una generación de tensiones residuales de compresión en la superficie del elemento mediante shot peening [3]. No obstante, un factor fundamental a considerar para determinar la bondad de un recubrimiento es su duración en el tiempo. La aplicación de los repetidos ciclos de fatiga conduce de forma inevitable a una eliminación del lubricante, alterando las condiciones respecto a las

existentes inicialmente. Además, la dependencia de la amplitud de deslizamiento respecto al coeficiente de fricción es compleja. Esto supone que un incremento de esta amplitud de deslizamiento, debido a una mayor efectividad del lubricante puede introducir unas condiciones que producen, de hecho, un deslizamiento parcial, lo que supone acelerar el daño [4].

La selección del recubrimiento viene condicionada por el tipo de material base a proteger. En el presente caso se ha efectuado el estudio sobre una aleación de aluminio 7075 en estado T6. Este hecho introduce una limitación a ser tenida en cuenta en el momento de seleccionar el recubrimiento a aplicar. Este estado T6 corresponde a la aplicación de un tratamiento de solubilización de las partículas de segunda fase, seguido de un enfriamiento lo suficientemente rápido para mantenerlas en solución sólida, y maduración para obtener una distribución fina y uniforme de estas partículas, confiriendo a la aleación la resistencia mecánica máxima. La aplicación de un recubrimiento que implicase un calentamiento a temperatura igual o superior a la de maduración provocaría una merma en la resistencia mecánica, razón por la cual queda fuera de toda consideración. No es preciso señalar que ello elimina a un buen número de los posibles procesos de recubrimiento. La máxima temperatura permitida en el proceso deberá ser inferior a 160° C. Considerando estas limitaciones se han seleccionado tres diferentes recubrimientos superficiales; una capa de bisulfuro de molibdeno y carburo de wolframio, depositada por medio de la técnica de PVD, un tratamiento de níquel químico con 12% de fósforo, aplicado en dos capas, una de ellas impregnada con partículas de PTFE y un anodizado duro con partículas de PTFE.

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material base empleado en el estudio consistió en unas barras de 35 mm. de diámetro de una aleación de aluminio, en estado T6, esto es, con un tratamiento de solubilización y maduración al pico de resistencia mecánica.

2.2. Recubrimientos

Como se ha señalado previamente se estudiaron tres diferentes tipos de recubrimientos. El primero de ellos corresponde a la deposición mediante la técnica de PVD (deposición física de vapor) de una capa, de aproximadamente 1.2 μm de espesor, de bisulfuro de molibdeno, modificada con carburo de wolframio, con vistas a mejorar sus prestaciones tribológicas y reducir la degradación por oxidación en condiciones atmosféricas.

El segundo recubrimiento seleccionado, conocido con el nombre comercial de Nituff®, combina la aplicación de un anodizado duro con partículas lubricantes de PTFE que se introducen bajo condiciones controlada, con vistas a que se incorporen a la capa de óxido que se ha formado, dando como resultado una superficie autolubrificante, más dura que el acero, en la cual las partículas forman una parte integral de la capa. En este proceso, el espesor de la capa que se obtiene es sensiblemente mayor puesto que alcanza 50 μm .

El tercer recubrimiento analizado consistió en una modificación de la tradicional deposición de níquel químico. Este recubrimiento consta de dos capas. La primera, de 2 μm de espesor aproximadamente, de níquel con 12% de fósforo, para mejorar la resistencia frente a la corrosión, y la segunda, de unas 7 μm de espesor, también formada por níquel con 12% de fósforo, impregnada con partículas de PTFE. Gracias a la incorporación de estas partículas se consigue una mejor la lubricación en seco, se eleva la resistencia frente al desgaste y aumenta el poder de repulsión de los contaminantes tales como el agua o el aceite.

2.3. Ensayos de desgaste

Se efectuaron ensayos de fricción y desgaste con el fin de caracterizar el comportamiento tribológico de los recubrimientos indicados en el apartado anterior y compararlo con el que ofrece la aleación de aluminio desnuda. Para ello se utilizaron discos de 35 mm. de diámetro y 5 mm. de espesor, sobre los que se aplicó el recubrimiento. En la realización de estos ensayos se empleó un tribómetro Falex ISC 320 con humedad controlada del 50 %, con una geometría de varilla sobre disco ("pin-on-disc"), con varilla semiesférica de aluminio (6mm de diámetro, con una dureza de 40-50 HB), bajo una carga de 1N, velocidad lineal del 0.1 m/s, durante 1 hora. Los ensayos se realizaron por triplicado

Para la cuantificación del desgaste sobre los discos se utilizó un perfilómetro óptico UBM con sensor microfoco, midiendo la sección de la huella de desgaste en los discos. Además se utilizó microscopía óptica convencional para la determinación del desgaste en las varillas.

La rugosidad de los discos se determinó, por medio de un rugosímetro Hommeweke tester T 1000, y se midió la ultramicrodureza utilizando un equipo Fischerscope H100 bajo una carga máxima de 10mN con una punta Vickers.

2.4. Ensayos de fatiga mecánica

Los ensayos de fatiga mecánica se efectuaron sobre probetas cilíndricas de 6 mm. de diámetro y 20 mm de longitud paralela. Estas probetas se mecanizaron a sus dimensiones finales previamente a la aplicación

de los recubrimientos, enmascarando posteriormente la zona de las cabezas para conseguir que no se vea afectada por los tratamientos superficiales. Dadas las pobres prestaciones mostradas por los recubrimientos de anodizado duro en los ensayos de desgaste se optó por no proseguir con su estudio. Por tanto, tan sólo se ensayaron a fatiga probetas recubiertas con bisulfuro de molibdeno y carburo de wolframio o con níquel químico, así como otro conjunto de material desnudo que sirva como base de comparación.

Los ensayos se efectuaron a temperatura ambiente, aplicando una onda sinusoidal, con una relación entre las tensiones mínima y máxima de cada ciclo de $R = 0$ y una frecuencia de 20 Hz. Los ensayos se llevaron hasta la rotura de la probeta o el momento en que ésta supera los dos millones de ciclos.

Finalizados los ensayos, la superficie de fractura de una mitad de cada probeta de fatiga se examinó en el microscopio electrónico de barrido, en tanto que se extrajo una probeta metalográfica longitudinal de la otra mitad, incluyendo la zona de fractura, para su observación en el microscopio óptico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En la Tabla 1 se presentan los valores del coeficiente de fricción medio, velocidad de desgaste de la varilla, anchura de la huella en el disco recubierto tras el ensayo, así como la rugosidad de los discos ensayados y la microdureza (H) bajo carga de 10 mN de los recubrimientos.

Todos los recubrimientos incrementan la rugosidad del material de partida, que se hallaba pulido a espejo ($R_a = 0.034 \mu\text{m}$). El aumento es relativamente ligero en las muestras que fueron recubiertas con bisulfuro de molibdeno y carburo de wolframio ($R_a = 0.053 \mu\text{m}$), pero sustancial en las de níquel químico con partículas de teflón ($R_a = 0.26 \mu\text{m}$) y especialmente en el caso del Nituff® con una $R_a = 0.64 \mu\text{m}$.

Tabla 1. Coeficientes de fricción medios, velocidad de desgaste en la varilla, anchura de la huella en el disco, rugosidad superficial, y microdureza bajo carga de 10 mN.

Capa	Coeficiente de fricción		V. desgaste varilla ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)		Anchura huella (μm)		R_a (μm)	H (GPa)
	VM	DS	V.M	DS	VM	DS		
Ni químico +PTFE	0.35	0.03	5.20 E-07	2.59 E-07	245	30	0.26	9.8
Nituff®	0.64	0.02	1.11 E-03	1.05 E-04	1555	207	0.64	6.9
MoS ₂ -WC	0.27	0.06	8.76 E-07	6.52 E-07	152	39	0.053	5.2
Sin recubrir	0.46	0.03	7.75 E-05	7.34 E-06	486	541	0.034	1.4

*VM: valor medio; DS: desviación standard

Los discos de aluminio recubiertos con Nituff® presentan un coeficiente de fricción medio durante el ensayo de pin-on-disc de 0.64. Las micrografías ópticas realizadas tanto en la huella de la varilla como en la huella del disco recubierto muestran que este coeficiente de fricción elevado se debe a la combinación de un desgaste abrasivo-adhesivo (ver figura 1 y 2). En la huella sobre el disco recubierto aparece aluminio adherido procedente de la varilla (ver figura 2). Además la huella sobre el disco recubierto con Nituff® tiene una anchura de 1555 μm , tres veces superior a la obtenida en la aleación base. Por otro lado la velocidad de desgaste de la varilla es la mayor de los sistemas estudiados ($1.11 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$). Una posible explicación al gran desgaste sufrido por la varilla pudiera hallarse en la combinación de la alta rugosidad que tiene la superficie del recubrimiento con una dureza superior al aluminio desnudo. Estas características dan lugar a mecanismos de desgaste adhesivo-abrasivo produciendo una alta velocidad de desgaste tanto en el disco como en la bola, así como un elevado coeficiente de fricción.

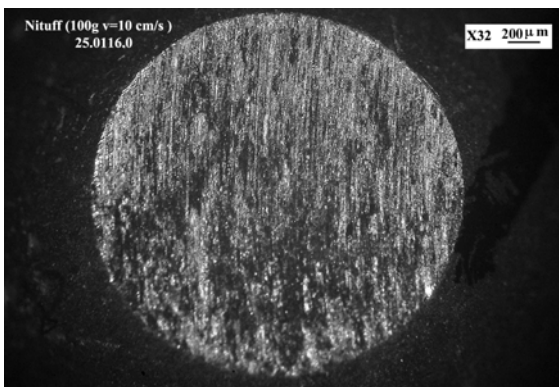


Fig.1: Micrografía óptica realizada sobre la huella en la varilla de aluminio desgastada contra el disco recubierto de Nituff (x100 aumentos)

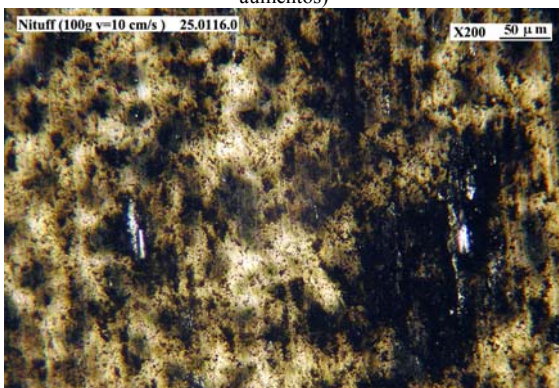


Fig.2: Micrografía óptica realizada sobre la huella en el disco recubierto de Nituff (x200 aumentos)

Los discos recubiertos con MoS_2 dopado con carburo de wolframio presentan un coeficiente de fricción medio de 0.26, frente a 0.46 que presenta el aluminio desnudo. En la figura 3 se observa la superficie de la varilla semiesférica tras el ensayo contra el disco

recubierto de $\text{MoS}_2\text{-WC}$, donde es evidente la transferencia de material del recubrimiento a la superficie de la varilla dando lugar a un “transfer film” mecanismo que es típico en capas finas convencionales de MoS_2 [5]. Esta transferencia de material lubricante del disco a la bola favorece que el coeficiente de fricción sea bajo, así como que la velocidad de desgaste tanto en la bola como en el disco sean las más bajas de los sistemas estudiados. La anchura de la huella en el disco recubierto con $\text{MoS}_2\text{-WC}$ es de 152 μm frente a las 486 micras en el disco de aluminio desnudo, presentando un desgaste muy suave como se muestra en la figura 4.

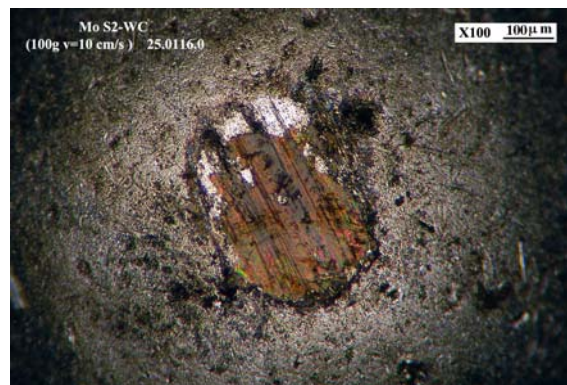


Fig.3: Micrografía óptica realizada sobre la huella en varilla de aluminio desgastada contra disco recubierto de $\text{MoS}_2\text{-WC}$ (x100 aumentos)

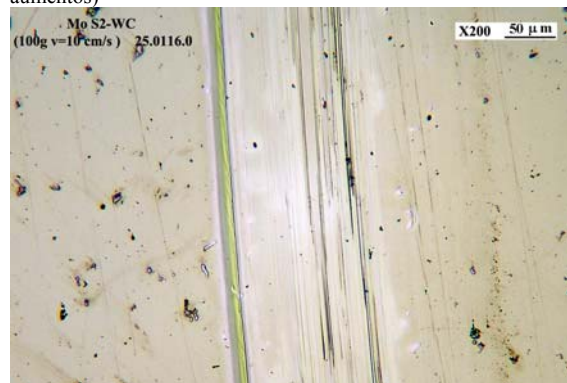


Fig.4: Micrografía óptica realizada sobre la huella en el disco recubierto de $\text{MoS}_2\text{-WC}$ (x200 aumentos)

En el caso de los discos recubiertos con una capa de níquel químico con partículas de teflón el coeficiente de fricción medio obtenido en los ensayos de pin-on-disc fue de 0.35, valor claramente inferior al que presenta el aluminio desnudo (0.46). En este caso también se observó un “transfer film” de material del recubrimiento sobre la superficie de la varilla (ver figura 5). Los discos recubiertos con níquel químico con partículas de teflón presentan huellas más estrechas que las de la aleación base, con una anchura media de 264 μm (ver figura 6).

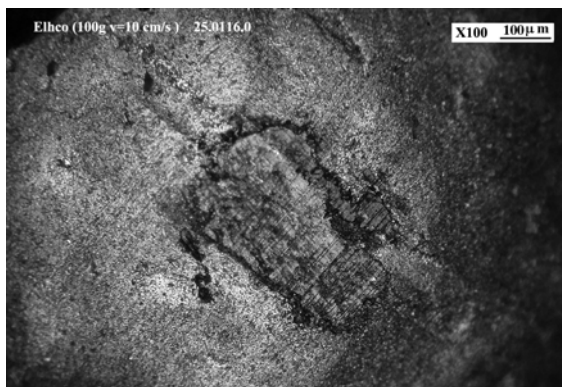


Fig.5: Micrografía óptica realizada sobre la huella en varilla de aluminio desgastado contra disco recubierto de níquel químico con partículas de PTFE (x100 aumentos)



Fig.6: Micrografía óptica realizada sobre la huella en el disco recubierto de níquel químico con partículas de PTFE (x200 aumentos)

A la vista de estos resultados se optó por centrar el estudio de la influencia de los recubrimientos sobre el comportamiento frente a la fatiga en aquellos que han mostrado unas mejores prestaciones en los ensayos de desgaste (bisulfuro de molibdeno y níquel químico con partículas de PTFE), no prosiguiendo en el análisis del Nituff®. Se ensayaron conjuntos de cinco probetas con cada uno de estos dos recubrimientos, así como otras cinco del material base desnudo.

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos en los ensayos de cada una de las probetas, mostrando el número de ciclos a rotura en función de la amplitud de la tensión aplicada. Se observa que las muestras recubiertas con níquel químico presentan una vida a fatiga notablemente menor que la exhibida por las de cualquiera de los otros recubrimientos. Esto llega al extremo de que la probeta que fue ensayada con una amplitud de tensión de 275 MPa, rompió en el primer ciclo de carga, convirtiéndose el ensayo de fatiga en uno de tracción.

Resulta sorprendente, no tanto que esta probeta haya podido romper a tracción, como que lo haya hecho con una tensión tan baja, (del orden de la mitad) del valor de la resistencia a tracción de la aleación 7075 en estado T6. Se pensó en un principio en un fallo de la máquina que había aplicado una sobrecarga capaz de provocar la rotura de la probeta. Se analizaron los

registros de ensayo de la máquina comprobando que no se había producido ningún fallo de este tipo. Otra posibilidad que se barajó fue la existencia de algún defecto, bien en la barra de aleación de aluminio, bien introducido en el proceso de recubrimiento, que se tradujera en una disminución de la sección resistente de la probeta.

Tabla 2. Resultados obtenidos en los ensayos de fatiga mecánica.

Amplitud (MPa)	Aleación base	MoS2-WC	Níquel químico
100	-	-	621200
150	-	-	234346
200	-	-	85927
225	-	917120	12718
250	> 2 E 06	549572	-
275	941190	537113	1
300	620741	176531	-
325	235526	62714	-
350	98762	-	-

El examen de la superficie de fractura de esta probeta en el microscopio electrónico de barrido no reveló la existencia de ningún defecto al que se pudiera asociar este comportamiento aparentemente anómalo. Por el contrario, puso de manifiesto que la totalidad de la superficie de fractura se hallaba cubierta por cúpulas dúctiles, propias de la actuación de un mecanismo de coalescencia de microcavidades, confirmando que la rotura se había producido por sobrecarga.

Dada la total ausencia de defectos en la probeta y que no se había producido ningún error en el ensayo de fatiga la explicación se debía buscar en un cambio de la microestructura del material capaz de provocar una merma en su resistencia. El análisis metalográfico de una mitad de esta probeta apunta a que el material ha sufrido un fuerte calentamiento en la aplicación del recubrimiento. La medida de durezas en esta probeta metalográfica confirma que el proceso ha provocado un acentuado ablandamiento del material. En este punto se debe señalar que estas probetas se recibieron con un recubrimiento que se consideró defectuoso, motivo por el cual se devolvieron para que este fallo fuera subsanado, eliminando el recubrimiento inicial y aplicando uno nuevo. Debido a este incidente no fue posible conocer si el fallo se debía a este proceso de recubrimiento, eliminación de la capa y aplicación de un nuevo recubrimiento, o si su origen se hallaba en el propio proceso de recubrimiento. Es necesario profundizar en este análisis antes de poder alcanzar una conclusión al respecto. No obstante, con los datos de que se dispone en este momento parece lógico el desaconsejar el empleo de este proceso, tanto más en cuanto al ablandamiento observado en estas probetas hay que añadir la aparición de claros defectos en la capa superficial tras el primer recubrimiento, lo que

induce a pensar que éste es un riesgo a ser tenido en cuenta.

Los ensayos de las probetas que fueron recubiertas con bisulfuro de molibdeno y carburo de wolframio también apuntan hacia una merma en las prestaciones frente a la fatiga aunque ésta es sensiblemente menos acusada a la observada en el caso del níquel químico. Considerando que, además, el comportamiento frente al desgaste de las probetas con este recubrimiento es el mejor de todos los analizados parece constituir una alternativa atractiva para mejorar la resistencia frente a la fatiga por fretting, aún más cuando los resultados publicados por otros investigadores [3] apuntan a una mejora en este sentido. No obstante serán los ensayos de fatiga por fretting los que confirmen o rechacen la consecución de una mejora con este recubrimiento.

4. CONCLUSIONES

- a. Se ha analizado el comportamiento frente al desgaste y la fatiga de una aleación de aluminio 7075 en estado de solubilización y maduración artificial al pico de máxima resistencia (T6).
- b. La aplicación de un recubrimiento de Nituff® (anodizado duro con partículas de PTFE) no supone ninguna mejora en la resistencia frente al desgaste de esta aleación sino que, incluso, los resultados son peores que los registrados en el material sin recubrir.
- c. El coeficiente de fricción de los discos que han sido recubiertos con Nituff® es el máximo entre todos los analizados.
- d. Tanto el desgaste del disco (medido a través de la anchura de la huella) como de la varilla que roza contra él son máximos en las muestras que fueron recubiertas con Nituff®.
- e. El pobre comportamiento frente al desgaste del material en este estado se atribuye a la aparición de un desgaste adhesivo que provoca que parte del material de la varilla se transfiera al disco, donde queda adherido.
- f. Las probetas recubiertas con níquel químico con partículas de PTFE presentan unos buenos resultados en lo que al desgaste de la varilla se refiere y el coeficiente de fricción se reduce frente al disco de aluminio sin recubrimiento.
- g. El mayor inconveniente del recubrimiento de níquel químico con partículas de PTFE se halla en las pobres prestaciones frente a la fatiga de las probetas a las que se les ha aplicado. Un examen metalográfico de las probetas apunta

em el sentido de que el material ha experimentado un cambio microestructural notable. La medida de durezas confirma la existencia de un notable ablandamiento.

- h. El hecho de que el primer recubrimiento de estas probetas presentara defectos, obligando a eliminarlo y aplicar uno nuevo impide conocer en este punto si el cambio microestructural se debe a todo este proceso o se producirá también en otras muestras que fueran recubiertas una sola vez.
- i. El recubrimiento con bisulfuro de molibdeno dopado con carburo de wolframio es el que mejor resultado ofrece desde el punto de vista de fricción y desgaste y tan sólo muestra una ligera disminución de la vida a fatiga frente al material base. Aunque serán los ensayos de fatiga por fretting los que confirmen o desmientan la bondad de este recubrimiento, los resultados disponibles apuntan a favor del mismo.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la ayuda prestada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología al proyecto FIT-020100-2001-507, del cual se ha extraído el presente trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] Domínguez J. "Análisis del comportamiento de recubrimientos aplicados a aleaciones de aluminio sometidos a fatiga por fretting" *Memoria Técnica del Proyecto*. (2002).
- [2] Shaffer S. J y Glaeser W. A. "Fretting fatigue" *ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture* ASM International (1996) pag. 321 – 330.
- [3] Lindley T. C. y Nix K. J. "Fretting fatigue in power generation industry" *Standardization of fretting fatigue test methods and equipment*. ASTM STP 1159, (1992) pag. 153 – 169.
- [4] Suresh S. *Fatigue of materials*. Cambridge University Press. (1998)., pag. 462 – 481.
- [5] Lansdown, A.R. "Molybdenum disulphide lubrication". *Tribology Series* (1999)