

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA FATIGA POR FRETTING Y SUS PALIATIVOS

Jaime Domínguez
Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 - Sevilla

Resumen. En este trabajo se presenta un análisis de las condiciones de trabajo de los sistemas sometidos a fatiga por fretting, se hace una revisión de los paliativos más usuales empleados para reducir el daño del fretting y se analizan las condiciones en que son efectivos unos y otros paliativos. En primer lugar se considera la influencia de los factores que mayor incidencia tienen en la fatiga por fretting, como son la amplitud de los deslizamientos, el coeficiente de rozamiento y las fuerzas de contacto y se analizan las condiciones en que la modificación de estos parámetros puede alterar el comportamiento a fatiga. Finalmente, se analizan los principales paliativos propuestos por distintos autores, clasificándolos en dos grandes grupos: modificaciones en el diseño para, de una forma u otra, modificar los estados de tensiones producidos; y los que modifican los estados de las superficies, ya sea para influir sobre el coeficiente de rozamiento, las tensiones producidas o la resistencia de las mismas.

Abstract. This work presents an analysis of the work conditions of systems subjected to fretting fatigue, a revision of the most frequent palliatives used to reduce the fretting fatigue damage and an analysis of the conditions under which these palliatives are effective. First of all, the effect of those factors which have a stronger influence on fretting fatigue is considered. Those factors are the relative displacement amplitude, the friction coefficient and contact forces. Also, the conditions in which those parameters can modify fretting fatigue behaviour are analysed. Finally, many palliatives proposed by different authors are analysed. They are classified into two groups: design modifications in order to modify the stress state at the stress concentration; surfaces transformations, either to influence on the friction coefficient, the stresses or the surfaces strength.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga por fretting es un fenómeno que puede aparecer en las superficies de contacto de dos elementos unidos bajo presión y cuyas superficies están sometidas a desplazamientos relativos micrométricos. Además de las tensiones locales producidas en la zona de contacto como consecuencia de la presión y la geometría de las superficies, los componentes bajo la acción del fretting pueden estar sometidos a otro campo de tensiones producido por cargas cíclicas tangenciales transmitidas entre las superficies. El resultado de esta combinación de efectos es la nucleación de numerosas grietas en la zona de contacto. Grietas que crecen de una u otra forma, dependiendo de las condiciones a que estén sometidas las superficies. Esas grietas pueden producir la deterioración de las superficies por desprendimiento de pequeñas lascas de material como consecuencia de la unión de dos o más de estas grietas superficiales durante su crecimiento. Otra posibilidad es el crecimiento de las mismas hasta la fractura final del elemento.

Hay muchos ejemplos de sistemas mecánicos en los que la fatiga por fretting es la principal causa de fallo. Algunos de estos ejemplos son las uniones atornilladas o roblonadas, los acoplamientos eje-cubo con ajuste a presión, las conexiones de álabes de turbina al rotor en turbomáquinas, los cables de acero, etc. (figura 1) [1]. Se pueden encontrar en la literatura muchos paliativos para eliminar o mitigar en lo posible la fatiga por fretting en estas aplicaciones, así como otros paliativos de aplicación general [2]. Sin embargo, son muy escasos los documentos que presentan una guía para la correcta selección de paliativos para distintas aplicaciones. No sólo existe una falta de directrices claras, sino que incluso se pueden encontrar en la literatura resultados contradictorios, o incluso erróneos, sobre la efectividad de determinados paliativos. Hasta años muy recientes no ha habido intentos claros para estandarizar ensayos que permitan cuantificar la efectividad de los citados paliativos. Como resultado, se da actualmente la situación de que la mayoría de los datos experimentales en la literatura se han obtenido en condiciones muy diferentes y como consecuencia los resultados son difícilmente comparables.

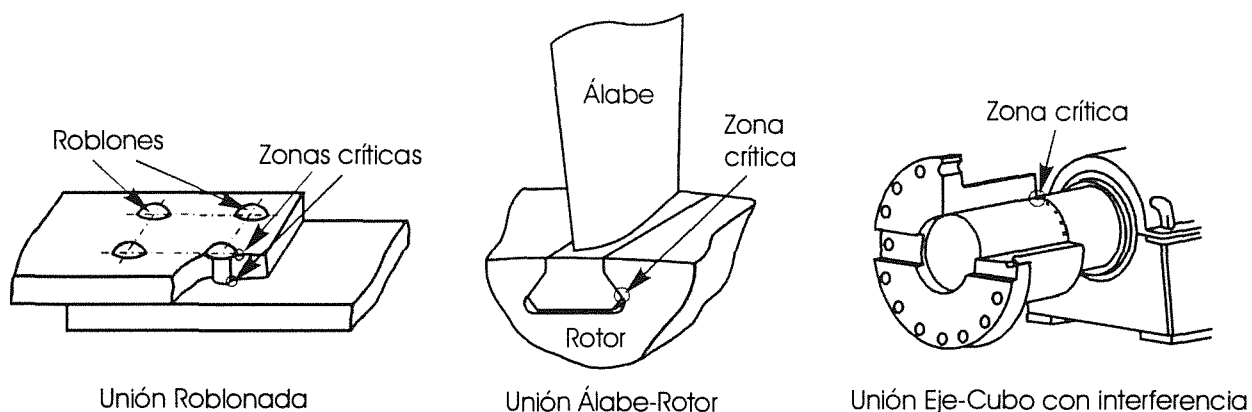


Figura 1. Ejemplos de sistemas en los que se presentan casos de fatiga por fretting [3].

De hecho, en general, es bastante bajo el nivel de comprensión de los mecanismos de la fatiga por fretting, aunque en los últimos años está mejorando apreciablemente la situación. En esa misma línea, hay muy pocos estudios sobre la forma en que los paliativos actúan sobre el proceso de daño por fretting.

Para ser capaces de hacer una selección racional de los paliativos a emplear ante determinada situación es imprescindible entender los mecanismos de la fatiga por fretting y cómo influyen los principales parámetros sobre los procesos de iniciación y propagación de la grieta. Por otro lado, también es necesario conocer las limitaciones de los datos existentes en la literatura y cómo estas limitaciones pueden influir sobre la selección de los paliativos. Para ello, es fundamental conocer los mecanismos por los que actúan los diferentes paliativos. Sólo cuando se disponga de toda esta información será posible hacer una selección fiable de los paliativos a aplicar para cada aplicación específica.

Aunque la situación presentada es difícil, no obstante, pueden alcanzarse muchos objetivos en cuanto al diseño y selección de paliativos para la fatiga por fretting. En general, las opciones a adoptar para mejorar la resistencia de los elementos a la fatiga por fretting pueden condensarse en dos grupos: las basadas en modificaciones del diseño que producen variaciones en los parámetros más importantes que afectan al fretting, y las que se basan en la modificación de las propiedades de las superficies en contacto, bien sea mejorando su resistencia o modificando los principales parámetros que afectan al fretting, por ejemplo, el coeficiente de rozamiento o las tensiones residuales.

Pero, incluso antes de decidir cual de las soluciones puede ser adoptada, hay otra posibilidad que debe ser considerada. Debe analizarse si es aceptable una modificación del diseño por la que se eliminen las superficies en contacto y, así, el problema del fretting. Por ejemplo, podría considerarse si una unión

atornillada puede sustituirse por una soldada o la sustitución de las dos piezas unidas por un solo elemento, aunque ello requiera un estudio sobre distintos aspectos como son: nuevos problemas de fatiga producidos en la nueva situación, imposibilidad de separar ambas piezas en la nueva situación, posibles deformaciones en el caso de la soldadura, nuevos costes de fabricación, etc.

En este trabajo se presenta un breve análisis de los paliativos y sus efectos sobre los parámetros que afectan a la fatiga por fretting y, por tanto, sobre el daño producido. Para entender mejor los paliativos, antes de este análisis de se va a estudiar el efecto de los parámetros más influyentes sobre la fatiga por fretting. Pero previamente a la consideración del efecto de diferentes parámetros, es importante distinguir entre dos mecanismos de control del deslizamiento en fretting: deslizamiento controlado por las fuerzas o tensiones actuantes, o controlados por la amplitud de movimientos relativos entre partes definidas de los cuerpos en contacto.

Por tanto, en primer lugar se analizarán las formas de control del deslizamiento relativo entre las superficies. Seguidamente, se considerará el efecto de diferentes parámetros sobre la fatiga por fretting, a la vista de los criterios de daño más extendidos para los casos de fretting. Y, finalmente, se presentarán los paliativos de uso más general y se analizará su efecto sobre los parámetros que gobiernan la fatiga por fretting y sobre el mismo proceso de daño.

2. ORIGEN DEL MOVIMIENTO RELATIVO

Es importante analizar la forma en que se genera el movimiento relativo entre las superficies de contacto. El conocimiento de la fuente del movimiento puede ser importante para determinar el potencial efecto de algún paliativo. Generalmente se distinguen dos condiciones distintas de deslizamiento. Si la amplitud del

movimiento es aproximadamente fija e independiente de la fuerza normal de contacto entre las superficies, se dice que el fretting se realiza bajo control del desplazamiento. Si la amplitud del deslizamiento varía con la fuerza normal de contacto aplicada, se dice que se realiza bajo control de las fuerzas o las tensiones. Es importante analizar la diferencia de comportamiento entre los sistemas en los que el movimiento relativo se produce como consecuencia de una fuerza o tensión variable aplicada a los elementos de una máquina y aquellos en que la causa del movimiento relativo es el desplazamiento entre los elementos en contacto.

En los sistemas con movimientos controlados por las fuerzas o tensiones, el grado de deslizamiento es generalmente una función no lineal de la fuerza o tensión aplicada al sistema. Si el deslizamiento está controlado por la fuerza, la carga tangencial transferida entre las superficies de contacto es aproximadamente constante, independientemente de la fuerza normal de contacto entre las superficies y del coeficiente de rozamiento. Por ejemplo, en uniones atornilladas con transmisión de esfuerzo por rozamiento, el área de la superficie de contacto sometida a microdeslizamiento aumentará al aumentar la fuerza externa aplicada. Por otro lado, con la misma fuerza externa, un incremento del coeficiente de rozamiento o de la fuerza normal de contacto producirá una reducción del área de contacto en la que se producen microdeslizamientos, modificándose la distribución de tensiones en la zona de contacto. Sin embargo, el valor total de la carga tangencial transmitida entre las superficies de contacto será el mismo. Otro ejemplo de problema controlado por la fuerza puede ser una unión eje-cubo con ajuste a presión.

Hay otros componentes de sistemas mecánicos que están sometidos a amplitudes aproximadamente fijas de movimiento relativo, independientemente de las cargas. Ese es el caso, por ejemplo, de los acoplamientos dentados entre ejes de transmisión. La amplitud del movimiento relativo entre las dos partes del acoplamiento está relacionada con el desalineamiento angular de los ejes conectados y no con el par transmitido o el coeficiente de rozamiento. En general, las características de estos sistemas con desplazamientos controlados es que están diseñados específicamente para sufrir esos pequeños desplazamientos y no es posible reducirlos o eliminarlos sin afectar al funcionamiento de todo el sistema mecánico. En esos casos en que está definida la amplitud de los desplazamientos, una reducción de las presiones de contacto o el coeficiente de rozamiento reducirá la carga tangencial total transferida entre las superficies y normalmente los niveles máximos de tensión producidos en las mismas.

Hay otras situaciones en las que no se produce realmente un control de la amplitud, pero en ciertas circunstancias pueden ser consideradas como tales. Un ejemplo de estas situaciones pueden ser los

desplazamientos que se producen entre los hilos de un cable de acero. Los deslizamientos entre mazos y entre hilos están controlados por las deformaciones generadas por las cargas aplicadas al cable. Además, la fuerza normal de contacto entre hilos no puede ser controlada externamente. En ese caso, una reducción del coeficiente de rozamiento disminuirá las tensiones superficiales en los hilos.

3. INFLUENCIA DE LA AMPLITUD DEL DESLIZAMIENTO

Antes de analizar la influencia de otros parámetros que afectan a la resistencia al fretting, es importante considerar especialmente el efecto de la amplitud del deslizamiento. Ha habido muchos estudios sobre la influencia de la amplitud del deslizamiento en el límite de fatiga por fretting y en la vida a fatiga. Hay resultados contradictorios sobre este efecto. Una de las razones para estos resultados contradictorios ha sido el empleo de diferentes métodos de ensayo y de medida de la amplitud de los deslizamientos por cada uno de los investigadores. Se han usado diferentes geometrías de los elementos de contacto, también ha sido diferente el tipo de control del deslizamiento: unas veces se ha controlado la amplitud, otras la fuerza aplicada. En cada ensayo, el desplazamiento relativo se ha medido a una distancia diferente de la zona de contacto, teniendo, además, probetas y elementos de contacto con diferentes geometrías. Todo esto hace difícil la comparación, ya que es muy difícil obtener una buena estimación del desplazamiento relativo real en los distintos puntos de las superficies de contacto a partir de las amplitudes medidas.

Hasta hace algunos años ha habido algún acuerdo sobre el incremento del daño de fatiga por fretting cuando aumenta la amplitud del deslizamiento cuando el desplazamiento máximo relativo está en el rango de valores entre 0 y 25 μm . Con valores superiores a 25 μm , la tendencia se invierte, resultando beneficioso el incremento de la amplitud del deslizamiento relativo. La Figura 2 muestra el resultado del análisis del efecto de la amplitud del deslizamiento sobre la resistencia a fatiga realizado por Söderstrom y Vinsbo [4]. Las curvas representadas muestran el desgaste y la resistencia a fatiga en función de la magnitud del deslizamiento (valor pico-pico), a la vista de los resultados publicados en la literatura sobre el tema. Aunque los procedimientos empleados por los distintos autores para medida de la amplitud del deslizamiento eran distintos, puede considerarse que las amplitudes medidas lo eran entre puntos de referencia que no estaban en el centro de las superficies de contacto. De acuerdo con esto, puede estimarse que la zona de la curva que representa la disminución de vida cuando los desplazamientos máximos varían de 0 a 25 μm es realmente una zona de deslizamiento parcial entre las superficies de contacto. Esta estimación toma fuerza si se considera la curva de desgaste en función de los

desplazamientos, en la que se aprecia que se produce una inflexión para valores próximos a los 25 μm tomados como referencia. Por debajo de 25 μm, el desgaste observado es muy pequeño, produciéndose un cambio brusco de pendiente en las proximidades de 25 μm. Este cambio es una consecuencia del paso de deslizamiento parcial a deslizamiento global de las superficies. Esto está en acuerdo con el análisis realizado por Zhou et al. [5] en el que se muestra que la situación más perjudicial en los ensayos de fatiga por fretting se produce cuando la condición del deslizamiento está en el límite entre deslizamiento parcial y global, es decir, cuando deja de existir al menos un punto de las superficies en contacto en el que no existe deslizamiento relativo.

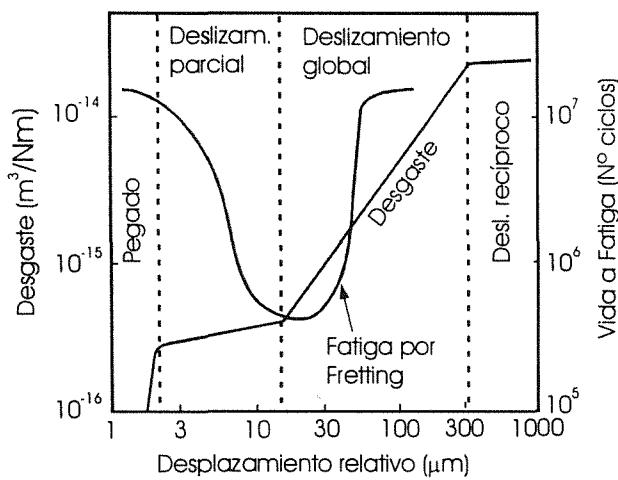


Figura 2. Vida a fatiga y desgaste en función del desplazamiento [4].

Una relación entre la resistencia a fatiga por fretting y “la amplitud del deslizamiento” en la región del deslizamiento parcial fue propuesta primero por Nishioka y Hirakawa [6]. Ellos propusieron una expresión para el límite de fatiga de una probeta sometida a tensión alterna axial bajo condiciones de fretting con contacto cilíndrico (figura 3). La resistencia a fatiga del material se aproxima mediante la ecuación

$$\sigma_{fw} = \sigma_w - 2\mu p_0 (1 - e^{-S/k}) \quad (1)$$

Donde σ_{fw} es el límite de fatiga bajo condiciones de fretting, σ_w es el límite de fatiga normal del material, μ es el coeficiente de rozamiento, p_0 es la presión máxima de Hertz en la superficie de contacto, S es la magnitud del desplazamiento relativo y k es una constante dependiente del material y las condiciones de la superficie.

Esta ecuación es sólo aplicable a la geometría usada por los autores en sus experimentos. Introduce el efecto de la interacción entre las superficies a través de los parámetros S y k , determinados experimentalmente.

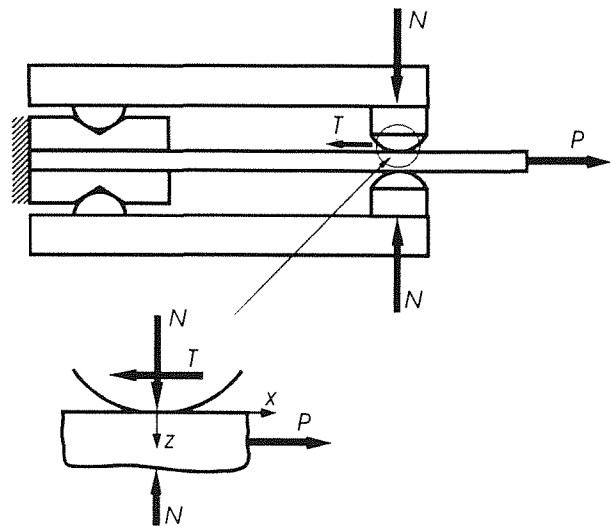


Figura 3. Esquema de un sistema típico de ensayo a fatiga por fretting

El término entre paréntesis en la ecuación (1) es la relación entre la carga tangencial, T , producida entre superficie cilíndrica y probeta en condiciones de deslizamiento parcial y su máximo valor admisible, que es el producido justo antes de alcanzar las condiciones de deslizamiento global (μP). Según el citado artículo, el segundo término del segundo miembro (realmente tiene un error en el exponente del término entre paréntesis, que debía ser $1/2$) es el máximo la tensión normal local, σ_{xx} , producida en la probeta en la dirección axial debido al fretting. En ese caso, según los autores, el límite de fatiga bajo condiciones de fretting, σ_{fw} , podría definirse como la tensión global axial aplicada a la probeta que produce un pico de tensión local (tensión global más tensión local debida a fretting) en esa dirección igual al límite de fatiga del material, σ_w :

$$\sigma_{fw} = \sigma_w - 2\mu p_0 \frac{T}{\mu P} \quad (2)$$

Así, esta aproximación puede considerarse como una variante de las aproximaciones al límite de fatiga basadas en los valores de las tensiones locales máximas producidas. El único parámetro asociado a la interacción entre las superficies es el coeficiente de rozamiento μ . Esta aproximación fue modificada posteriormente, sólo para el caso de deslizamiento global ($T = \mu P$), por Wharton et al. [7] introduciendo un coeficiente de sensibilidad a la entalla, q , transformando la ecuación a:

$$\sigma_{fw} = \sigma_w - q2\mu p_0 \quad (3)$$

Donde q se hacía dependiente de todos los factores desconocidos asociados al fretting, resultando de difícil evaluación.

Ruiz et. al [8], basados en los resultados obtenidos en ensayos biaxiales y en análisis mediante el método de los elementos finitos de la unión entre los álabes y el disco en una turbina de gas (Figura 4), propuso el uso de un "parámetro de daño", F , para analizar el punto de iniciación de grieta por fatiga debida a fretting. Dicho parámetro es una función de las tensiones en la superficie y el desplazamiento relativo de las mismas. Se define mediante la expresión:

$$F = \sigma_T \delta \tau \tag{4}$$

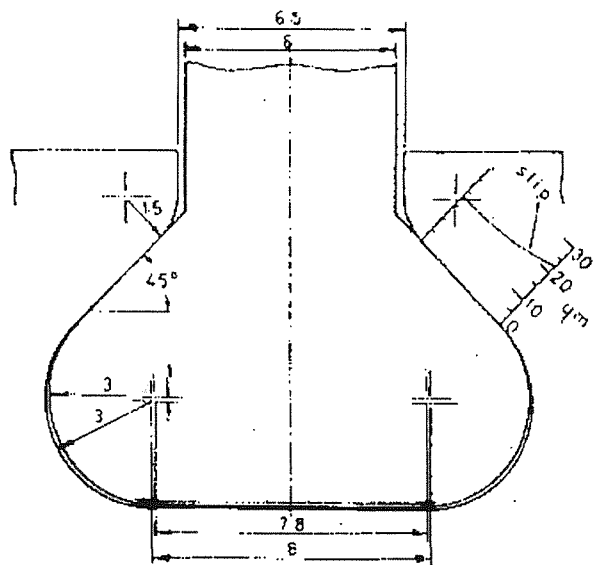


Figura 4. Esquema de la unión álabo-disco usada por Ruiz et al. [8].

Donde σ_T es la tensión normal en dirección paralela al deslizamiento en las superficies de contacto, τ es la tensión tangencial en las citadas superficies y δ es el desplazamiento relativo entre las mismas, en cada punto. Usando este parámetro, ellos pudieron definir el punto de iniciación de la grieta, encontrando además una buena correlación entre el valor de este parámetro en el punto de iniciación y las vidas a fatiga por fretting obtenidas en ensayos realizados a temperatura ambiente. Ellos encontraron que la grieta se desarrolla en el punto donde el parámetro de daño F es máximo y no donde la tensión normal en la dirección del deslizamiento, σ_T , es máxima. La figura 5 muestra una representación de las tensiones obtenidas numéricamente en las superficies de contacto con diferentes coeficientes de rozamiento, comprobándose la buena coincidencia entre la situación en que se producen los valores máximos y los puntos de aparición de las grietas. Sin embargo, considerando la tensión tangencial, τ , como parámetro que define la zona de iniciación en lugar de usar σ_T , y usando las tensiones obtenidas por los citados autores con un coeficiente de rozamiento $\mu = 0.5$ y una carga igual a 20 kN [8], se puede comprobar que la tensión tangencial máxima se produce en la zona donde se inicia la grieta. Usando los datos obtenidos por los autores para otros

niveles de carga (obtenidos de sus figuras), se puede comprobar que la tensión tangencial máxima se produce también en esos casos en la zona de iniciación de las grietas. Considerado la amplitud de la tensión tangencial máxima como parámetro característico, sus valores para los tres niveles de carga analizados por Ruiz et al. son 350, 375 y 410 Mpa. La relación entre estos valores concuerdan razonablemente bien con las relaciones de vida obtenidas en los ensayos.

Así, de acuerdo con los resultados experimentales, el "parámetro de daño por fretting fatiga", F , que incluye un parámetro de interacción entre las superficies (δ), puede ser útil para estimar la vida a fatiga por fretting. No obstante, el uso de la tensión tangencial máxima, τ , como parámetro para correlacionar las condiciones de carga y la vida a fretting fatiga parece ser igualmente útil.

Del análisis anterior, puede aceptarse que, para desplazamientos relativos pequeños (asociados a situaciones de deslizamiento parcial) el nivel de tensión en la superficie da una estimación buena del daño que producirá el fretting. Así, el análisis del efecto de diferentes parámetros como el coeficiente de rozamiento o la carga normal de contacto sobre el daño debido al fretting puede ser hecho considerando su efecto sobre el campo de tensiones producido en la superficie. El parámetro de daño puede ser uno de los parámetros definidos por los criterios de fatiga multiaxial basados en las tensiones producidas en las superficies de contacto.

Cuando la amplitud del deslizamiento es mayor, generalmente en condiciones de deslizamiento global, la variación de la vida a fatiga con amplitud del deslizamiento es opuesta al caso de pequeñas amplitudes: la resistencia a fatiga por fretting aumenta con la amplitud del deslizamiento. Este efecto se ha atribuido tradicionalmente al desgaste de las superficies en las zonas donde se han iniciado las grietas antes de que éstas puedan alcanzar el tamaño suficiente que les permita crecer a mayor velocidad. Sin embargo, en los últimos años, se han propuesto otros efectos para explicar este incremento de resistencia con la amplitud del deslizamiento relativo:

1. El desgaste modifica la geometría produciendo una reducción de las tensiones de contacto.
2. Un efecto importante del incremento de la amplitud de los deslizamientos, especialmente en la transición entre deslizamiento parcial y global, es la reducción del coeficiente de rozamiento, μ , lo que produce un reducción de las tensiones en la zona de contacto.
3. Beard [9] realizó numerosos análisis metalográficos en probetas resultantes de ensayos interrumpidos en los que se aplicaron grandes amplitudes de deslizamiento. Comprobó que la amplitud de deslizamiento ejercía su efecto mediante el control de la dirección de propagación de la grieta. Cuando

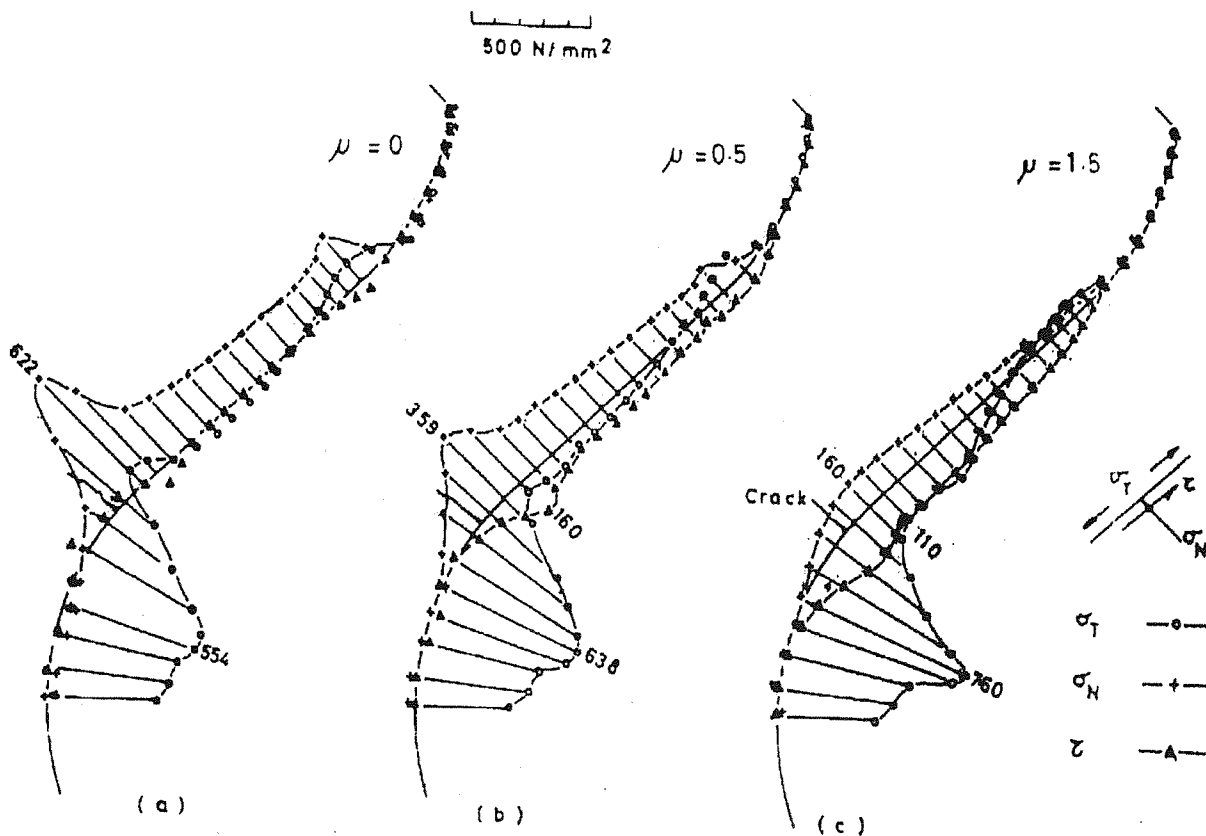


Figura 5. Tensiones obtenidas mediante elementos finitos en las superficies para los diferentes coeficientes de rozamiento μ [8].

se incrementa la amplitud, la grieta, después de crecer unas micras, experimenta una tendencia a girar y propagarse paralelamente a la superficie. Finalmente, se propaga hacia la superficie, desprendiendo una lasca y produciendo una picadura, en lugar de propagarse hacia el interior del elemento. El mecanismo es similar al que produce el picado de las superficies en los casos de rodadura.

- Otro efecto que se ha comprobado en ensayos con superficies de contacto esféricas [10] es la reducción de las amplitudes de las tensiones en los puntos críticos cuando se incrementa la amplitud del deslizamiento. La figura 6 muestra la evolución de la amplitud de la tensión equivalente de von Mises, σ_{eq} , a lo largo del eje de simetría de la superficie de contacto (eje x) para diferentes amplitudes de deslizamiento, δ . Estas amplitudes se representan normalizadas al radio, a , de la zona de contacto (x/a). La evolución de las tensiones se representa para dos profundidades distintas: la superficie ($z = 0$) y $z = 0.05a$.

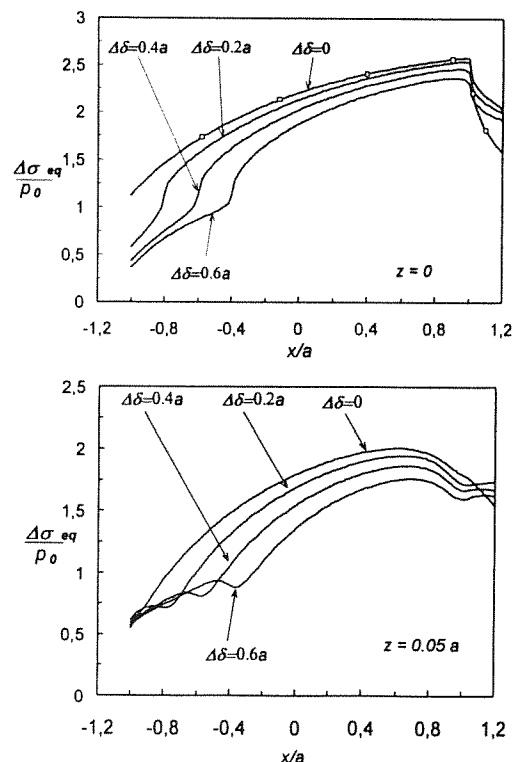


Figura 6. Variación de la tensión equivalente de von Mises con δ [10].

Todos estos efectos o algunos de ellos, dependiendo de la geometría y las condiciones de ensayo, pueden actuar simultáneamente. En cualquier caso, constituyen una base para la explicación del efecto beneficioso que tiene el

aumento de la amplitud del deslizamiento sobre la resistencia a fatiga en los casos en que las amplitudes de deslizamiento están por encima de ciertos valores.

La discusión anterior permite concluir que en situaciones reales deben distinguirse dos casos: deslizamiento global y parcial. Con deslizamiento global, un incremento de la amplitud del deslizamiento tiende a reducir el daño por fatiga. Sin embargo, aumentará el desgaste, debiendo analizarse su incidencia. En casos de deslizamiento parcial, la amplitud de éste no es un parámetro fundamental. El parámetro que debe considerarse en esos casos es la variación de la tensión local producida bajo las condiciones de trabajo que se producen.

4. INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO Y LA CARGA DE CONTACTO

Hay un grupo de paliativos que incrementa la resistencia a fatiga por fretting mediante la modificación de las condiciones de contacto. Generalmente son dos los parámetros que suelen modificarse para mejorar la resistencia a fatiga: el coeficiente de rozamiento, μ , y la carga normal de contacto, P . Para analizar su efecto debe estudiarse la forma en que afectan a las tensiones en las proximidades a las superficies de contacto.

Chivers y Gordelier [11] hicieron un análisis de la variación de la tensión axial máxima en la superficie, σ_{xx} , en función de los parámetros citados, para los casos de contacto entre superficies cilíndricas y esféricas. Aunque las situaciones reales de contacto suelen ser más complejas que los contactos cilíndricos y esféricos, el análisis es muy interesante para conocer la forma en que μ y P afectan a la resistencia a fatiga. Los autores distinguieron dos casos, que ellos llamaron “fuerza constante” y “desplazamiento constante”, que son equivalentes a los que se han denominado antes como situaciones con fuerzas o desplazamientos controlados,

respectivamente. Para “fuerza constante” ellos analizaron únicamente el caso de deslizamiento parcial. Para el caso de “desplazamiento constante”, analizaron ambas condiciones de deslizamiento: global y parcial. Considerando que la reducción de σ_{xx} producirá un incremento de la vida a fatiga, los autores sugirieron una serie de cambios deseables en las condiciones de contacto para mejorar el comportamiento a fatiga por fretting. Los resultados se presentan en la tabla 1.

Para entender el comportamiento de las tensiones cuando cambian μ y P , a continuación se presentan algunos ejemplos de variación del parámetro de McDiarmid, F_{MD} , [12] para fatiga multiaxial en función de μ y P para el caso de contacto esférico. En cada punto del cuerpo objeto de análisis, F_{MD} es dependiente principalmente de la variación de la tensión tangencial máxima, $\Delta\tau_{max}$, y en menor medida de la tensión normal máxima, σ_{max} , en el plano donde se produce $\Delta\tau_{max}$. El parámetro se define:

$$F_{MD} = \frac{\Delta\tau_{max}}{2} + \frac{t_1}{2\sigma_{TS}} \sigma_{max} \tag{5}$$

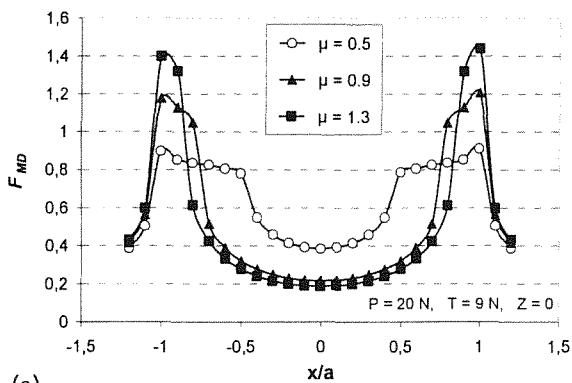
Donde σ_{TS} es la resistencia a tracción y t_1 es el valor de F_{MD} en el límite de fatiga. Este parámetro puede considerarse como una tensión equivalente.

La figura 7a muestra la variación de F_{MD} en el eje de simetría de la superficie de contacto cuando μ varía entre 0.5 y 1.5. Se puede comprobar que los picos de este parámetro aumentan con μ . Sin embargo, considerando puntos situados debajo de la superficie, la situación cambia. La figura 7b muestra la variación de F_{MD} en una línea situada a una distancia $z = 0.05a$ debajo del eje de simetría de la superficie de contacto. A esta distancia de la superficie, los valores máximos de F_{MD} son muy similares, con independencia del valor del coeficiente de rozamiento. A profundidades mayores

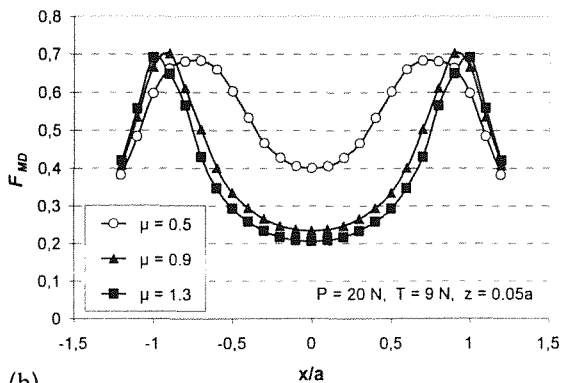
Tabla 1. Cambios deseables en las condiciones de contacto para mejorar el comportamiento a fatiga por fretting.

Condiciones de contacto	Esferas			Cilindros		
	Deslizamiento global	Deslizamiento parcial		Deslizamiento global	Deslizamiento parcial	
		Fuerza constante	Desplazamiento constante		Fuerza constante	Desplazamiento constante
Cambios en μ que mejoran el comportamiento	Reducir μ (σ_{xx} varía ~ lineal con μ valores altos de éste)	Aumentar μ (para μ bajo) Reducir μ (para μ alto)	Reducir μ (muy eficaz cerca del deslizamiento global)	Reducir μ (σ_{xx} responde linealmente)	Reducir μ (σ_{xx} varía con $\mu^{1/2}$)	Reducir μ (muy eficaz cerca del deslizamiento global)
Cambios en P que mejoran el comportamiento	Reducir P (σ_{xx} varía con $P^{1/3}$)	Aumentar P (muy eficaz cerca del deslizamiento global)	Reducir P (Cerca del desliz. global) Aumentar P (Cerca del desliz. nulo)	Reducir P (σ_{xx} varía con $P^{1/3}$)	Independiente de P	Reducir P (muy eficaz cerca del deslizamiento global)

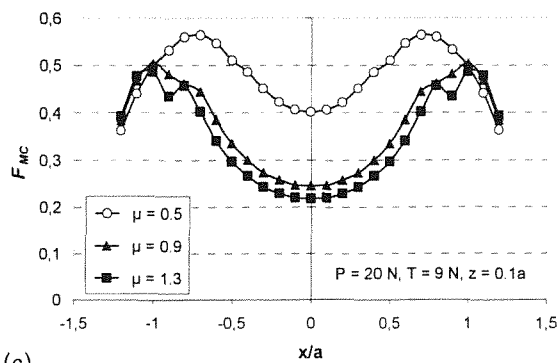
respecto a la superficie de contacto la situación cambia: los coeficientes de rozamiento más bajos producen los picos mayores de tensión. Este efecto puede comprobarse en la figura 7c, donde se muestra la variación de F_{MD} a lo largo de una línea situada en el plano de simetría de la superficie de contacto, a una distancia $z = 0.1a$. Esta evolución de F_{MD} con la profundidad hace más difícil conocer el efecto de μ sobre la resistencia a fatiga por fretting. Con bajo coeficiente de rozamiento, la iniciación se producirá después que con alto valor de μ , sin embargo, una vez que la grieta alcanza cierto valor, la velocidad de crecimiento será mayor con bajos valores de μ que con valores altos.



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Variación de F_{MD} en el eje de simetría de la zona de contacto para varios valores de μ , y distintas profundidades, z : (a) $z = 0$; (b) $z = 0.05a$; (c) $z = 0.1a$. $P = 20 \text{ N}$, $T = 9 \text{ N}$ (Fig. 3).

Respecto al efecto de la variación de la fuerza normal de contacto, P , cuando la fuerza tangencial, T , se mantiene constante, la figura 8 muestra la evolución de F_{MD} en el eje de simetría de la superficie de contacto para diferentes valores de P . En este caso, el aumento de P produce una reducción del parámetro F_{MD} , con la consiguiente mejora de la resistencia a fatiga.

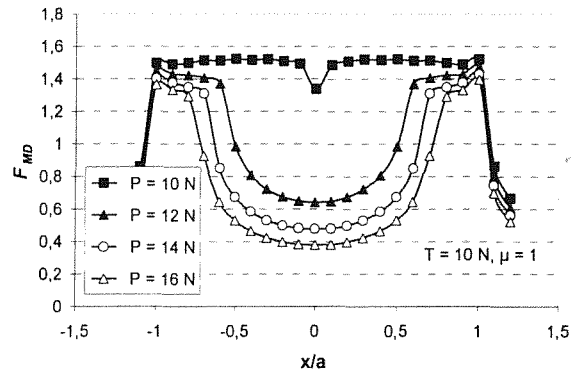


Figura 8. Variación de F_{MD} en el eje de simetría de la superficie de contacto para diferentes valores de P .

5. MODIFICACIONES DEL DISEÑO

Respecto a las modificaciones del diseño para mejorar la resistencia a fatiga por fretting, la primera decisión que debe tomarse es reducir las concentraciones de tensión en las proximidades de los contactos. Algunas veces no es difícil encontrar diseños alternativos que reduzcan la concentración de tensiones. Otras veces no es fácil saber si una modificación va a reducir o no las concentraciones de tensión y hay que recurrir a análisis numéricos. Normalmente estos análisis están orientados a la determinación de tensiones y, de ellas, un parámetro de los empleados para los criterios de fatiga multiaxial. También, para el estudio del crecimiento de grietas pequeñas en las proximidades de las superficies de contacto, se emplean criterios basados en la mecánica de la fractura. A continuación se muestran algunos ejemplos simples de modificaciones del diseño para mejorar la resistencia a fatiga por fretting.

Un ejemplo típico de diseño para reducir tensiones en un ajuste a presión de un eje con un cubo es el aumento del diámetro en la zona de ajuste, como se muestra en la figura 9. Este aumento debe realizarse con un radio de acuerdo suficiente para evitar concentraciones de tensión adicionales. Otra solución es la utilización de ranuras de alivio de tensiones como también se muestra en la figura. Estas soluciones producen una reducción muy pequeña de tensiones en la superficie de contacto, pero producen un alto gradiente de tensiones debajo de la superficie, lo que hace que el factor de intensidad de tensiones para grietas pequeñas sea mucho menor que en la solución básica del ajuste. Esa reducción del factor de intensidad de tensiones puede ser suficiente para

hacer que esté por debajo del umbral de crecimiento de la grieta por fatiga y, por tanto, que se detenga la grieta [13]. En casos de ajustes a presión bajo cargas axiales, una reducción de la presión de ajuste reducirá las tensiones en la superficie [14].

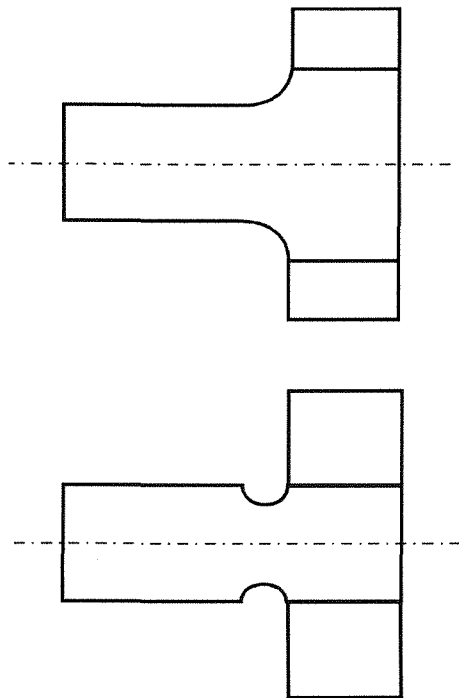


Figura 9. Ejemplos de modificaciones de diseño para reducir tensiones en uniones eje-cubo.

Otro caso de fallo por fretting es el de las uniones cargadas mediante un bulón (Figura 10). Un procedimiento para mejorar la resistencia a fatiga por fretting es la modificación de la geometría del bulón, haciéndole dos planos, como se indica en la figura. 10b. Dichos planos descargan la zona de la placa próxima a ellos, que es donde se producen las concentraciones de tensión, con lo que se consigue una mejora de la resistencia a fatiga [15]. Otra posibilidad es mediante el ajuste a presión entre el bulón y el agujero. La figura 10c muestra unos resultados obtenidos por Iyer et al. [16]. Muestra la variación del parámetro F , de Ruiz (ecuación (4)) alrededor del agujero en dos casos, uno sin ajuste a presión, y otro con una interferencia del 1%. Se puede comprobar la drástica reducción de los valores del parámetro F cuando se monta con cierta interferencia.

En el caso de uniones atornilladas, rediseñar la unión para reducir la fatiga es difícil. No es posible reducir el coeficiente de rozamiento o la presión de contacto ni introducir un material intermedio que reduzca el coeficiente de rozamiento, ya que el objetivo es transmitir la fuerza mediante fricción. Una reducción de la misma obligaría a transmitir parte de la fuerza por contacto entre el tornillo y el agujero, apareciendo un nuevo problema de fretting. Una posible solución sería sustituir la unión atornillada por otra con adhesivos.

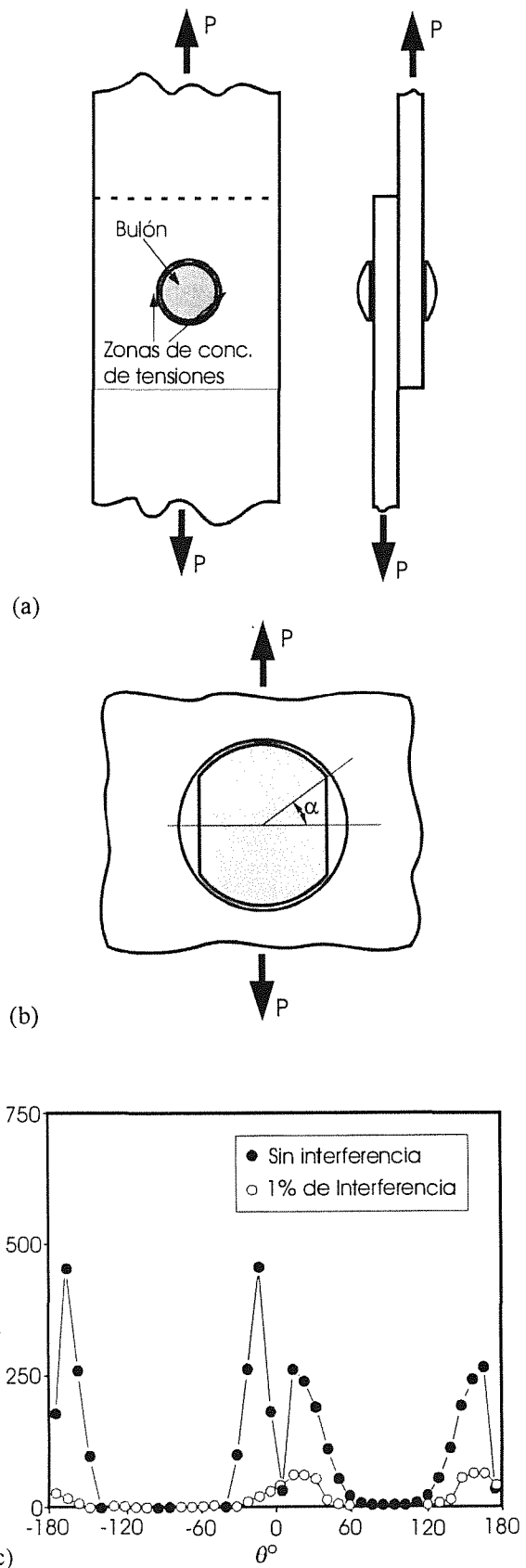


Figura 10. (a) Ejemplo de unión con pasador o bulón. (b) Solución para reducir las tensiones máximas. (c) Distribución del parámetro F , de Ruiz, a lo largo de la periferia del agujero con y sin interferencia; $\mu=0.2$ [16]

En general, puede decirse que cualquier nueva solución de diseño debe ser analizada para determinar su efecto sobre las tensiones y, como consecuencia, sobre la resistencia a fatiga por fretting. Las tensiones en la superficie tendrán influencia sobre la iniciación, mientras que su distribución bajo la superficie serán importantes para analizar la posibilidad de propagación de las grietas iniciadas.

6. MODIFICACIÓN DE LAS SUPERFICIES

Las modificaciones de las superficies que se emplean normalmente para combatir la fatiga por fretting pueden agruparse en función del tipo de modificación y los mecanismos que actúan para prevenir el fallo. Pueden considerarse tres grupos: los tratamientos mecánicos, como el shot o el roll peening, los tratamientos termomecánicos y los recubrimientos. Para su análisis, es importante considerar los mecanismos asociados a la acción de los distintos paliativos y la forma en que estos modifican los procesos de iniciación y crecimiento de las grietas. A continuación se tratan algunos de ellos.

Peening

Hay numerosos trabajos sobre los efectos beneficiosos del shot peening sobre la fatiga por fretting. Los investigadores han intentado identificar los efectos de cada uno de los tipos de modificación de las superficies que produce el tratamiento: incremento de la rugosidad superficial, endurecimiento local por deformación, alteración de la microestructura, que se concreta en un aplastamiento de los granos, con el consiguiente incremento del número de barreras que tiene que atravesar una grieta para desarrollarse, y en un aumento de la densidad de dislocaciones y aparición de un campo de tensiones residuales de compresión.

Tradicionalmente se ha considerado que las tensiones residuales producidas por el shot peening son las causantes de la mejora del comportamiento a fatiga. El shot peening produce un estado de tensiones residuales de compresión en una capa superficial del elemento y tensiones de tracción debajo de dicha capa. El máximo de tensiones residuales se produce en una zona muy próxima a la superficie, como se muestra en la figura 11. Sin embargo, actualmente se sabe que hay otros factores que también contribuyen a esta mejora del comportamiento. A continuación se comenta brevemente la forma en que pueden incidir estos factores.

No está claro cómo actúan las otras alteraciones producidas por el shot peening sobre la superficie. La deformación superficial introduce un número importante de grietas superficiales que pueden actuar como puntos de iniciación. Sin embargo, el crecimiento subsiguiente de la grieta se ve impedido, o al menos dificultado, por el campo de tensiones residuales de

compresión. El cambio de la estructura de los granos puede contribuir a reducir la velocidad de propagación haciendo que la grieta siga un camino más sinuoso, como se muestra en la figura 12. El incremento del número de barreras en las proximidades de la superficie puede contribuir a detener grietas en proceso de iniciación y crecimiento en los primeros granos.

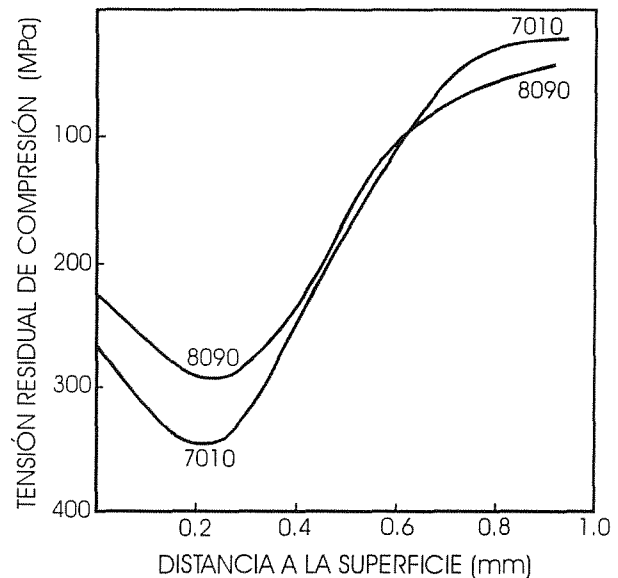


Figura 11 Perfil de tensiones residuales producidas por shot peening en dos aleaciones de aluminio [17].

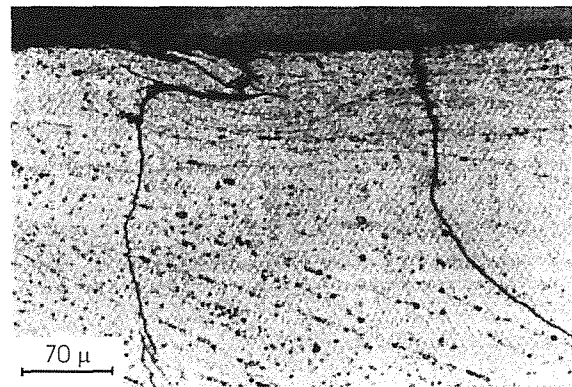


Figura 12. Trayectoria de la grieta en una probeta de Al 7010 con la superficie tratada con shot peening [17]

La figura 13 muestra las curvas de fatiga obtenidas por Bignonnet [18] para un acero cromo-níquel. La figura 13a muestra las vidas obtenidas en el caso de fatiga simple y bajo condiciones de fretting en probetas lisas sin tratamiento superficial. La figura 13b muestra las mismas curvas, pero para probetas sometidas a shot peening. La tercera curva de esta figura muestra el caso de fatiga por fretting de una probeta sometida a shot peening y eliminación de tensiones residuales antes del ensayo. Se observa que una vez eliminadas las tensiones residuales, la resistencia a fatiga vuelve a ser similar a la obtenida sin shot peening.

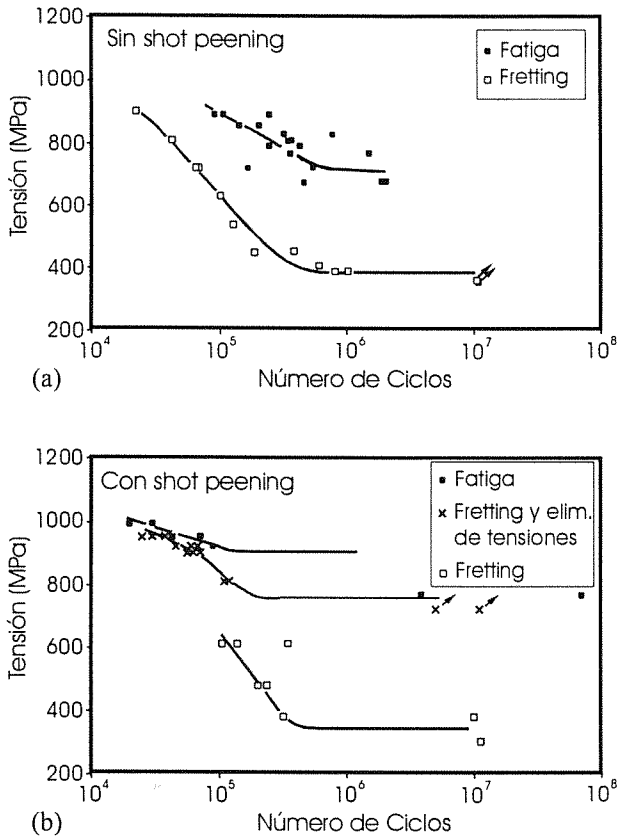


Figura 13. Curvas S-N, con y sin fretting, para distintos tratamientos superficiales [18].

Un efecto similar puede encontrarse cuando se somete a deformación permanente de tracción a una probeta previamente sometida a shot peening. La figura 14 muestra resultados obtenidos con una aleación de aluminio 2014A [19] en probetas sin shot peening, otras con shot peening y un tercer grupo con deformación permanente del 0.5% después del shot peening. Puede comprobarse que en este último caso la deformación permanente ha eliminado todo el efecto beneficioso del shot peening. Dado que la deformación permanente de tracción tiene poco o ningún efecto sobre la capa endurecida por deformación y que prácticamente no perturba la estructura cristalina, esto sugiere que el principal efecto del shot peening en fatiga por fretting es producido por el campo de tensiones residuales.

Las sobrecargas tienden a producir la detención de la grieta como consecuencia del incremento del tamaño de la zona plástica en el frente de la grieta. Sin embargo, cuando las probetas han sufrido shot peening, las sobrecargas pueden tender a reducir la efectividad de la capa con tensiones residuales de compresión [20].

La rugosidad superficial producida por el shot peening puede tener un efecto beneficioso en fatiga por fretting. Se ha comprobado que distribuyendo el área real de contacto en pequeñas áreas discretas, como ocurre en estas superficies rugosas, se retrasa la iniciación de las grietas [19, 21, 13]. La figura 15 muestra las curvas de

fatiga obtenidas en una aleación de aluminio 2014A bajo condiciones normales (figura 15a) y de fretting (figura 15b), para tres tratamientos superficiales distintos: sin shot peening, con shot peening, y con shot peening y pulido posterior. Puede verse que el pulido después del shot peening aumenta la resistencia a fatiga normal, sin embargo, reduce la resistencia a fatiga por fretting.

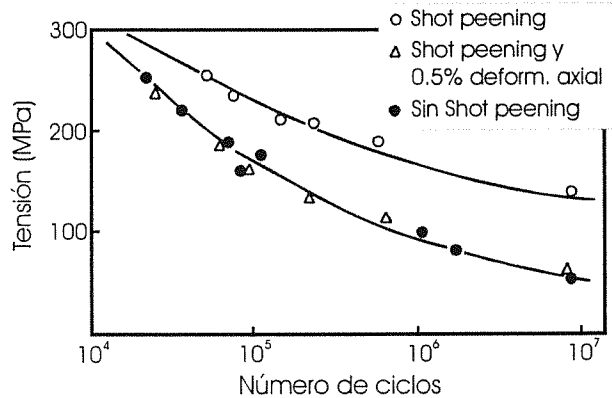


Figura 14. Curvas S-N para la aleación de aluminio 2014A, con fretting y distintos estados superficiales

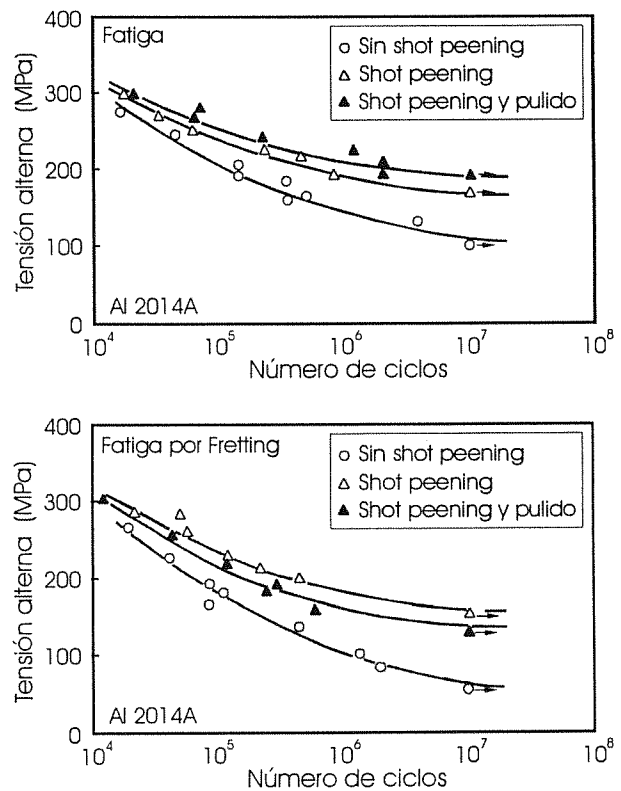


Figura 15. Curvas S-N de la aleación de aluminio 2014A, para tres tratamientos superficiales distintos. (a) Condiciones normales de fatiga. (b) Fatiga por fretting. [19].

Tratamientos termoquímicos

Los tratamientos termoquímicos implican generalmente la difusión de carbono o nitrógeno a través de la superficie. A veces se utiliza también cromo, boro, aluminio o sílice como elemento a difundir. Pueden considerarse dos categorías: los realizados a altas temperaturas, con el acero en forma de austenita, y los realizados a bajas temperaturas (menor de 600°), con el acero en forma de ferrita.

Las tensiones residuales de compresión desarrolladas por estos tratamientos mejoran normalmente la resistencia a fatiga. En general, cualquier tratamiento que mejore la resistencia a fatiga y no produzca un cambio significativo del coeficiente de rozamiento produce también un incremento de la resistencia a fatiga en condiciones de fretting. Sin embargo, el proceso que produzca el mayor incremento de resistencia a fatiga normal, no tiene por qué ser el que produzca el mejor resultado en fretting.

Los tratamientos termoquímicos más usuales son cementado, nitrurado, y combinaciones de estos. Estos tratamientos incrementan apreciablemente la dureza superficial y crean un estado de altas tensiones residuales de compresión en la superficie.

El cementado es un proceso realizado a alta temperatura (825-925°). El material es templado y revenido, produciendo una capa superficial dura y tenaz de varios milímetros de espesor. Un problema que presenta es que va acompañado de cambios dimensionales que pueden afectar a la calidad del elemento si no son tenidos en cuenta.

El nitrurado se realiza a temperaturas inferiores a 600°. Produce menores distorsiones dimensionales, aunque tiene el inconveniente de que requiere elementos de aleación en el acero que permitan la formación de los nitruros.

Según Kreitner [22], puede considerarse que el nitrurado es mejor paliativo para la fatiga por fretting que el cementado. De acuerdo con sus estudios, el cementado produjo mejor resistencia a fatiga normal, pero en condiciones de fretting la resistencia a fatiga se redujo en un 45%. Por el contrario, en el caso de nitrurado, la resistencia a fretting fatiga fue del 90% de la resistencia a fatiga normal.

Recubrimientos

Recubrimientos químicos y electroquímicos.

En general, se han empleado tanto recubrimientos blandos como duros para reducir la fatiga por fretting. Sin embargo, puede decirse que los recubrimientos son el tipo de paliativo que ha suscitado en la literatura más opiniones contrapuestas respecto a su comportamiento.

No están claras las razones para esta controversia. Sin embargo, sí ocurre a veces, que el éxito de un recubrimiento determinado depende en gran medida del sistema de ensayo empleado o de la aplicación real para la que se ha propuesto.

A veces se ha sugerido que la razón por la que se comportan bien los recubrimientos blandos en fretting fatiga es su capacidad para absorber los movimientos entre las superficies [23]. Sin embargo, la amplitud de movimiento que puede ser absorbida elásticamente por estas capas es muy pequeña para poder considerar ésta una explicación válida.

Waterhouse [24] comprobó que recubrimientos electrolíticos como el plomo, zinc, latón, plata, cobre y níquel producen incrementos en la resistencia a fatiga por fretting al aumentar el espesor de los mismos. La plata y el cobre parecen ser los mejores materiales, pero la plata tiende a ser expulsada de la zona de contacto, cosa que no ocurre con el cobre. Aunque estos recubrimientos pueden ser beneficiosos en determinados casos, la poca durabilidad de los mismos es su principal limitación. También, la porosidad del recubrimiento, las tensiones residuales y la fragilización por hidrógeno pueden reducir la resistencia a fatiga normal, por lo que debe ser tenido en cuenta.

Entre los recubrimientos duros que pueden aplicarse, el cromado es probablemente el mejor conocido por su resistencia al desgaste. Sin embargo, los recubrimientos duros de cromo suelen estar excesivamente tensionados y agrietados. En condiciones en que están lubricadas las superficies, las pequeñas fisuras trabajan como puntos de almacenamiento del lubricante, con el consiguiente efecto beneficioso. En condiciones de fatiga, tiene el problema de que las pequeñas grietas actúan como concentradores, con la consiguiente reducción de la resistencia a fatiga, a veces hasta del 80%. Alguna mejora puede conseguirse si se aplica un shot peening a la superficie.

Sprays

Los recubrimientos duros depositados mediante spray pueden dar a la superficie una alta resistencia al desgaste, sin embargo, hay poca información sobre su efecto en la resistencia a fatiga por fretting. En general, estos recubrimientos se han empleado con mucha más frecuencia para reducir el desgaste que la fatiga por fretting. Hay numerosos recubrimientos de este tipo comercializados, así como numerosos procedimientos de deposición.

Recubrimientos duros obtenidos por deposición con spray reducen la resistencia a fatiga normal debido al estado de tensiones residuales de tracción que generan en la superficie. Sin embargo, Syers [25] comprobó que determinados tipos de recubrimientos son generalmente efectivos en condiciones de fatiga por fretting y que

aplicados a aleaciones de titanio producían mejoras en la resistencia a la fatiga por fretting de hasta un 33%. La resistencia a fatiga normal, sin embargo, se veía reducida en un 40 ó 50%.

El recubrimiento con spray de molibdeno es, probablemente, el mejor conocido por su uso en la industria de la automoción. Se usa para mejorar la resistencia al desgaste de los discos de sincronización de las cajas de cambio y de los segmentos en los pistones. Normalmente se elige por su alto punto de fusión, su dura capa de óxido y las buenas características de retención del aceite. Se han comprobado casos en los que la resistencia a fatiga por fretting ha aumentado al doble [26], aunque hay una reducción sustancial en la resistencia a fatiga normal del sustrato.

El beneficio principal de los recubrimientos duros depositados con spray deriva de la reducción que producen en el coeficiente de rozamiento, lo que los hace útiles para los casos de problemas con desplazamientos controlados. Por otro lado, su estructura de capas hace a veces que la propagación se produzca sólo en el recubrimiento, sin que penetre en el sustrato, con el consiguiente efecto beneficioso.

Otros Paliativos

Hay otros paliativos que se emplean en casos de fatiga por fretting, como son la lubricación de las superficies, el uso de inserto o el, menos usual, ranurado de las superficies. A continuación se consideran brevemente.

Lubricantes

La lubricación produce una reducción importante del coeficiente de rozamiento. En situaciones con fuerzas controladas, este efecto producirá un incremento del deslizamiento, que puede ser perjudicial. Es el caso, por ejemplo, de uniones atornilladas, donde el incremento del deslizamiento puede afectar a los tornillos, que tienen que soportar unas cargas mayores. Sin embargo, en situaciones con desplazamientos controlados, la lubricación puede ser muy beneficiosa para reducir la fatiga por fretting. La aplicación de un lubricante reducirá las fuerzas tangenciales transmitidas y las tensiones de contacto durante el deslizamiento. El principal problema de los lubricantes estriba en su corta duración. A menos que se esté aplicando con suficiente frecuencia, el deslizamiento relativo entre las superficies lo expulsará y eliminará la película de lubricante. En general son más empleados en aplicaciones de bajo número de ciclos, y cuando no hay otra solución. En cualquier caso, debe relubricarse a intervalos regulares.

Una alternativa al aceite o grasa lubricante es el lubricante sólido, tales como el disulfuro de molibdeno o el óxido de zinc. Son muy efectivos para reducir el daño por fretting pero, como en los casos anteriores, sólo para

bajo número de ciclos. Si la aplicación es de alto número de ciclos, los lubricantes sólidos no son satisfactorios, a menos que se relubrique con cierta frecuencia.

Películas intermedias

Se ha comprobado que el microdeslizamiento puede evitarse colocando películas finas de material flexible entre las superficies sometidas a fretting. Si la película tiene el espesor y flexibilidad adecuada puede eliminarse la concentración de tensiones producida generalmente en el borde de las zonas de contacto, al tiempo que se elimina el deslizamiento relativo. Aunque puede ser muy efectivo para ciertas aplicaciones, no obstante, tiene ciertas limitaciones que deben considerarse. Normalmente, estas películas son sólo aplicables para pequeños movimientos relativos entre las superficies. Por otro lado, el aumento de flexibilidad producido al aplicar la película intermedia puede ser inaceptable para ciertas aplicaciones. Otra posible limitación de este paliativo es la durabilidad de la capa interfacial ante las cargas y deformaciones variables a que están sometidas.

A pesar de esas limitaciones, la capacidad de las películas interfaciales para eliminar las concentraciones de tensión en las superficies puede hacerlas muy efectivas en diversas aplicaciones sometidas a fretting, entre las que sobresalen las uniones atornilladas.

7. CONCLUSIONES

La selección de soluciones para mitigar o eliminar la fatiga por fretting en un diseño cualquiera es difícil y aún bastante subjetiva. Por un lado, es difícil por la falta de un conocimiento claro de todos los mecanismos de daño que tienen lugar durante el fretting. Por otro lado, queda aún mucho para conocer adecuadamente los mecanismos con los que actúan determinados paliativos. Finalmente, la diferencia entre las condiciones de trabajo de dos sistemas distintos sometidos a fretting puede hacer que un paliativo sea bueno para uno de los sistemas y contraproducente para el otro. Éste puede ser el caso de la diferencia entre los sistemas que funcionan con desplazamientos controlados o con fuerzas controladas.

En cualquier caso, cada vez está más aceptado que los niveles de tensiones en la superficie y los gradientes existentes en las proximidades de las superficies de contacto son los parámetros que determinan en mayor grado la iniciación y posterior desarrollo de una grieta por fatiga debida a fretting. En ese sentido, la selección de los paliativos debe hacerse considerando detalladamente las condiciones de trabajo de cada caso y las tensiones que se generan. A partir de este estudio deberán seleccionarse aquellos que modifiquen las

condiciones de trabajo, nivel de tensiones o resistencia de los elementos en el sentido deseado.

8. AGRADECIMIENTO

Creo que es justo reconocer la labor desarrollada por los profesores Manuel Elices y Manuel Fuentes desde la creación del Grupo Español de Fractura, impulsando el desarrollo de la Mecánica de la Fractura en España y potenciando la generación de grupos de investigación sobre distintas áreas de la Mecánica de la Fractura en diferentes lugares de nuestra geografía. Por ello, quiero agradecerles el gran trabajo realizado, que ha hecho posible tanto la edición de los Anales de Mecánica de la Fractura y la celebración de los encuentros anuales de forma ininterrumpida desde 1984, como que nuestro país sea reconocido internacionalmente en el campo de la Mecánica de la Fractura.

9. REFERENCIAS

- [1] Waterhouse, R. B. and Lindley, T. C., *Fretting Fatigue*, ESIS Publication No 18, European Structural Integrity Society. Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1994.
- [2] R.B. Waterhouse (Ed.) *Fretting Fatigue*. Applied Science Publishers, 1981.
- [3] T. Hattori, "Fretting Fatigue Problems in Structural Design", *Fretting Fatigue*, ESIS 18, (Edited by R. B. Waterhouse y T. C. Lindley), Mech. Eng. Publ., 437-451, 1994.
- [4] O. Vingsbo and Söderberg, "On Fretting Maps", *Wear*, 126, 131-147, 1988.
- [5] Z.R. Zhou, S. Fayeulle and C. Vincent, "Cracking Behaviour of various Aluminium Alloys During Fretting Wear", *Wear* 155, 1992, 317-330.
- [6] K. Nishioka and K. Hirakawa, "Fundamental Investigations of Fretting Fatigue (Part 5, The Effect of Relative Slip Amplitude)", *Bulletin of JSME*, Vol. 12, Nº 52, 692-697, 1969.
- [7] Wharton, M. H., Waterhouse, R. B., Hirakawa, K. and Nishioka, K., "The Effect of Different Contact materials on the Fretting Fatigue Strength of an Aluminum Alloy", *Wear*, 26, 253-260, 1973.
- [8] Ruiz, C, Boddington P. H. B. and Chen, K. C., "An Investigation of the Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint", *Exp. Mech.*, 24, 208-217, 1984.
- [9] Beard, J., "Palliatives for Fretting Fatigue", *Fretting Fatigue*, ESIS 18, 419-436, 1994.
- [10] J. Domínguez, "Cyclic Variations in Friction Forces and Contact Stress During Fretting Fatigue", *Wear* 218, 43-53, 1998.
- [11] T.C. Chivers, S.C. Gordelier, "Fretting Fatigue and Contact Conditions: a Rational Explanation of Palliative Behaviour", *Proc. Instn. Mech. Engrs*, Vol. 199, Nº C4, 325-337, 1985.
- [12] McDiarmid, D. L., "Mean Stress Effect in Biaxial Fatigue where the Stresses Are Out-of-phase and at Different frequencies," in *Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loading*, K. Kussmaul, D. McDiarmid and D. Socie, Eds., ESIS 10, Mechanical Engineering Publications, pp. 321-335, 1991.
- [13] T. Hattori, M. Nakamura and T. Ishizuka, "Fretting Fatigue Analysis of Strength Improvement Models with Grooving or Knurling on a Contact Surface", *Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment*, ASTM STP 1159, 101-114, 1992.
- [14] J. Dobromirski and Ian O. Smith, "A Stress Analysis of a Shaft with a Press-Fitted Hub Subjected to Cyclic Axial Loading", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 28, Nº 1, 41-52, 1986.
- [15] R.B. Waterhouse (Ed.) *Fretting Fatigue*. Applied Science Publishers, Chap 10, 221-240, 1981.
- [16] K. Iyer, G. T. Hahn, P. C. Bastias y C. A. Rubin, 1995, "Analysis of Fretting Conditions in Pinned Connections", *Wear*, Vol. 181-183, pp. 524-530.
- [17] Lindley, T. C. and Waterhouse, R. B., "Prevention of Fatigue by Surface Engineering", *Engineering Against Fatigue*, (J. H. Beynon, M. W. Brown, T. C. Lindley, R. A. Smith, and B. Tomkins, Eds.), Balkema, 487-499, 1999.
- [18] Bignonnet, A., "Some Observations of the Effect of Shot Peening of Fretting Fatigue", *Fretting Fatigue*, ESIS 18 (R. B. Waterhouse and T. C. Lindley, Eds.), 475-482, 1994.
- [19] R. B. Waterhouse, "Residual Stress and Fretting, Crack Initiation and Propagation", *Advances in Surface Treatments, Vol. 4, International Guidebook on Residual Stresses*, A. Niku-Lari, Pergamon Press, 511- 525, 1987.
- [20] de los Rios, E.R., Walley, A., Milan, M.T. & Hammersley, G., "Fatigue crack initiation and propagation on shot peened surfaces in A316 stainless steel", *Int J. of Fat.* 17 (7). 493-499, 1995.
- [21] Bramhall, R., "Studies in Fretting Fatigue", PhD thesis, University of Oxford, 1973
- [22] Kreitner, L., "The effect of false brinelling and fretting fatigue on the fatigue life of assembled machine components," *Forschungshefts Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.*, Part 56 (1976): RAE Trans, 1979.
- [23] Waterhouse, R. B., *Fretting corrosion, International series of monographs on materials science and technology* (D. W. Hopkins Ed.) Vol. 10, Pergamon, Press, Oxford, 1972.
- [24] Waterhouse, R. B., Brook, P. A., and Lee, M. C., "The effect of electrodeposited metals on the fatigue behaviour of mild steel under conditions of fretting corrosion," *Wear*, 5, 235-244, 1962.
- [25] Syers, G., "The protection of certain titanium alloys against fretting fatigue", *Rolls Royce Lab. Research Report 10245/FS/78*, 118, 1978.
- [26] Taylor, D. E. and Waterhouse, R. B., 1972, "Sprayed niobium coatings as a protection against fretting fatigue," *Wear*, 20, 401-407.