

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE PROPAGACIÓN DE GRIETAS DEL IN718 A ALTA TEMPERATURA USANDO LA TÉCNICA A.C.P.D.

S. Torregrosa, I. Gurrutxaga, A. Linaza y K. Ostolaza

Laboratorio de Materiales de la DI&T de ITP, Departamento de Materiales y Procesos.
Industria de TurboPropulsores, ITP, SA, Parque Tecnológico no. 300, 48170-Zamudio, Bizkaia, España

Resumen. El presente trabajo recoge las curvas de propagación de grietas a 550° C en una superaleación base níquel que se utiliza en discos de turbina. Se ha estudiado la propagación de grietas en dicho material para dos geometrías de probeta, la probeta compacta CT, que permite estudiar el crecimiento de una grieta larga y la probeta axial denominada “Corner crack” cuyo diseño replica la geometría de las grietas encontradas en los componentes reales, e incorpora una grieta físicamente corta en una zona relativamente cargada. La determinación de la longitud de grieta se ha realizado a través de la técnica de medida de caída de potencial (en su variante de corriente alterna), y tras el tratamiento de datos se han obtenido las curvas da/dN vs ΔK a dicha temperatura. Se han comparado las leyes de propagación para ambas geometrías de grieta. El trabajo se ha completado con el estudio de los mecanismos de fractura operantes.

Abstract. This paper contains the crack propagation curves at 550° C for a Ni based superalloy used for turbine discs. Fatigue crack propagation has been analysed for two specimen geometries, conventional compact or CT specimen, that allows analysing long crack growth behaviour, and the axial specimen named “corner crack” designed to replicate crack geometry found in real cracked components, and includes a physically small crack located in an area withstanding moderate stresses. Crack length during test has been measured by means of alternating current potential drop method (ACPD), and after data treatment da/dN vs ΔK curves have been obtained at that temperature. Crack propagation behaviour for both crack geometries has been compared. Fracture mechanisms acting on material have also been assessed to complete the work.

1. INTRODUCCIÓN

Los criterios de diseño de los discos de turbina exigen el conocimiento de las leyes que rigen el crecimiento de grietas por fatiga y la tenacidad a la fractura del material a las temperaturas de operación. Todo ello es necesario para prevenir que ocurra la rotura del disco durante su funcionamiento, que supondría un fallo catastrófico de la turbina.

El presente trabajo incluye las curvas de propagación de grietas a la temperatura de 550 °C para una variedad de la superaleación base níquel INCONEL 718 que se utiliza para la fabricación de discos de turbinas de gas para uso aeronáutico. La determinación experimental de las curvas da/dN vs ΔK para el IN718 a alta temperatura se ha realizado para dos geometrías de probeta, la probeta compacta tipo CT, y la probeta axial denominada “corner crack”, o CC.

La probeta CT es una de las probetas estándar contempladas por la norma ASTM E647 -99 [1], y permite caracterizar el crecimiento de una grieta larga bajo condiciones en las que la tensión actuante en la sección resistente está en el rango elástico bastante, y la

fuerza impulsora es el factor de intensidad de tensiones definido por la teoría elástica lineal.

La probeta axial denominada “Corner Crack” es una de las contempladas por dicha norma ASTM para la medida de la velocidad de propagación de las grietas “pequeñas” desde el punto de vista físico. Además de ésta existen otras que intentan replicar las geometrías de las grietas encontradas en componentes reales. La Fig.1, extraída de la norma ASTM E647 muestra dichas geometrías.

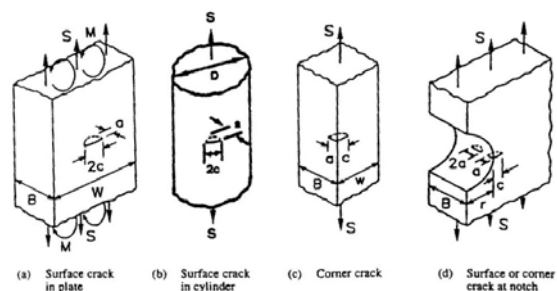


Fig. 1. Esquema de las probetas diseñadas para el estudio de las grietas “físicamente” pequeñas o cortas.

El crecimiento por fatiga de este tipo de grietas “físicamente cortas” tiene lugar bajo niveles de tensión próximos al límite elástico del material, y en algunos estadios incluso superiores. Para la obtención de las curvas da/dN vs ΔK en estas geometrías de probeta se han desarrollado técnicas específicas descritas en la literatura [2].

La probeta de tipo “corner crack” utilizada en el presente trabajo es una probeta desarrollada para simular las geometrías de las grietas encontradas en localizaciones críticas de los discos de turbina [3]. La generación de una pequeña grieta en corner en el material se fuerza a partir de una entalla artificial con dicha forma a través de corte por hilo. Es conocido que para este tipo de probetas “corner crack” la propagación transcurre a velocidades inferiores a las que se producen para el mismo valor de ΔK en probetas CT, lo que permite unas estimaciones de vida útil del componente más realistas.

Desde el punto de vista experimental y dado que los ensayos se realizaron a alta temperatura, con las probetas confinadas en el interior de un horno, se utilizó la técnica de medida indirecta de la longitud de grieta por medio del método de caída de potencial en su vertiente de corriente alterna (A.C.P.D). Esta técnica presenta una serie de ventajas con respecto a la tradicional basada en la corriente continua, como son su mayor sensibilidad, la respuesta lineal del cambio en el voltaje con el crecimiento de la longitud de grieta, y un inferior efecto termoelectrónico debido a las menores intensidades de corriente empleadas [4].

Tras la obtención de las correspondientes curvas de calibración Voltaje vs longitud de grieta, a los sucesivos registros a vs N han permitido determinar los valores da/dN vs ΔK durante el ensayo, a partir de las expresiones analíticas de ΔK propuestas por las normas.

2. MATERIAL Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El material objeto de estudio es una variedad de In718 utilizado en la fabricación de discos (Ni 19Cr 19Fe 5.3 Nb+Ta, 3Mo, 0.90 Ti, 0.6 Al). Las probetas se han extraído de una forja de disco, que se encuentra en el estado de tratamiento térmico final de uso en el componente, lo que requiere de un tratamiento de solución seguido por otro de precipitación.

La microestructura del material se muestra en la Fig.2. Consiste en una estructura equiaxial de granos de fase γ , endurecida por precipitación de fase γ' ($Ni_3(Al, Ti)$) de tamaño nanométrico, y por partículas micrométricas de fase delta, δ , de composición próxima a Ni_3Nb , situadas preferentemente en junta de grano. Además contiene como partículas de segunda fase carburos de niobio (mayoritarios) y carbonitruros de titanio. El tamaño de grano promedio se encuentra en torno a las 11 micras.

Las probetas se mecanizaron de acuerdo a los criterios establecidos por la norma ASTM E 647-99 [1] para la probeta CT, y por la norma Pr EN 3873-01 [5] para la probeta CC. Las dimensiones que definen el tamaño de probeta para ambas geometrías son:

- Probeta CT, B=13 mm, W=26 mm
- Probeta Corner Crack, B=W=7 mm

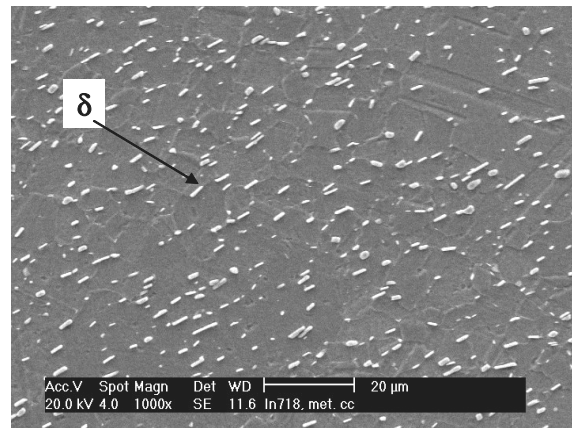


Fig. 2. Microestructura del In718 en la sección T

El procedimiento de mecanizado fue controlado con el objeto de introducir un mínimo de tensiones residuales en las áreas de material a estudiar. La probeta CT contiene una entalla recta, mientras que en la “corner crack” se introduce mediante corte por hilo una pequeña entalla en una esquina de entre 300 y 400 micras. La orientación de la entalla en ambas probetas es LT.

Las probetas se instrumentalizaron soldando hilos de platino en las posiciones establecidas por las normas para cada geometría de probeta, tanto para la introducción de los pulsos de corriente eléctrica como para la lectura de voltaje en las proximidades del plano de la grieta. En la Fig. 3 se muestra la posición de los terminales en la probeta corner crack

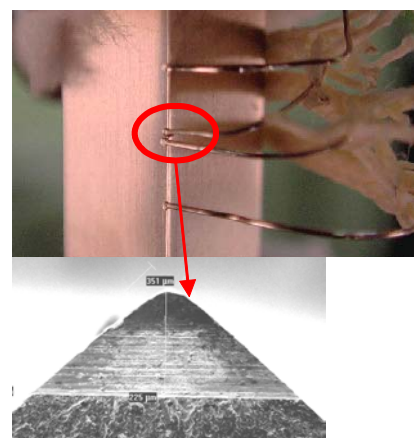


Fig. 3. Detalles de los terminales soldados en la probeta corner crack. Vista de la sección transversal de la entalla.

Los ensayos se realizaron en una máquina servohidráulica MTS de 100 KN de capacidad, equipada con un horno de resistencias de 2 zonas que permite calentar el conjunto de las mordazas y las probetas hasta la temperatura de ensayo. La variación en temperatura en toda la longitud galgada es de $\pm 3^\circ\text{C}$. El equipo de medida de caída de potencial, que es a la vez la fuente de corriente alterna, es un equipo **Matelect CGM7** de 2 A capaz de trabajar a una frecuencia de hasta 100 KHz.

Ambos tipos de probeta se preagrietaron a temperatura ambiente bajo $R=0,03$ aplicando una onda de carga sinusoidal a una frecuencia de 15 Hz. La longitud de grieta inicial es de 8,5 mm para la probeta CT y de 0,7 mm para la probeta CC.

Los ensayos para la determinación de las curvas de propagación de grietas bajo cargas cíclicas de amplitud constante se realizaron utilizando la norma ASTM E647-99 para la probeta CT y la norma prEN 3873-01 para la probeta CC, a una temperatura de 550°C . Para cada tipo de probeta se realizaron 2 ensayos.

Las condiciones de ensayo para los dos tipos de probeta se detallan a continuación:

- Control de carga, ΔP constante, de 25 KN para la probeta CC y 6 KN para la probeta CT, lo que supone un valor de ΔK inicial de aproximadamente $17\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
- $R=0,1$
- Ambiente: aire dentro del horno, $T=550 \pm 3^\circ\text{C}$.
- Tiempo de calentamiento 60 min, y tiempo de mantenimiento a 550°C previo al ensayo 30 min.
- Forma de onda: trapezoidal, 1_1_1_1, es decir 1 s bajo carga mínima, 1 s rampa hasta carga máxima, 1 s bajo carga máxima y 1 s rampa hasta la carga mínima. La frecuencia de ensayo es de 0,25 Hz.
- Frecuencia del pulso eléctrico 300 Hz, rango de voltaje entre 1 y 1,4 voltios
- Resolución en la señal eléctrica 0,001 V; y en la medida indirecta de la longitud de grieta de 20 a 30 μm .

Para la obtención de la curva de calibración que permite relacionar la señal de voltaje con la longitud de grieta para cada tipo de probeta se realizaron interrupciones del mismo, tras los cuales se aplicó durante unos pocos ciclos una onda de carga sinusoidal a 10 Hz, $R=0,8$ y carga máxima igual a la carga máxima de ensayo. Estas incursiones a mayor frecuencia provocan marcas sobre la superficie de fractura que permiten medir a posteriori la longitud de grieta, y calcular las ecuaciones de ajuste V vs a , y de ahí a vs N .

Los pares de valores $a - N$ se agruparon en grupos de 7. Los valores de da/dN para el punto central del dominio se calcularon aplicando el método de la secante y el valor de ΔK aplicando las expresiones analíticas de K para cada tipo de grieta. En el caso de las grietas CC el valor del factor de intensidad de tensiones es distinto en las superficies, y en el interior. Por convenio, el valor de

ΔK que se considera es el actuante a 45° , es decir en la bisectriz.

Las expresiones de ΔK en función de $\alpha = \frac{a}{W}$ son:

- Probeta CT (validez para $\alpha \geq 0,2$)

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (1)$$

- Probeta CC (validez para $0,2 \leq \alpha \leq 0,75$)

$$\Delta K_{90^\circ} = \frac{\Delta P}{BW} \sqrt{\pi a} \frac{2}{\pi} M_G M_B M_S \quad (2)$$

$$M_G = 0,1\alpha^2 + 0,29\alpha + 1,081 \quad (3)$$

$$M_B = 0,75\alpha^2 - 0,185\alpha + 1,019 \quad (4)$$

$$M_S = 0,90\alpha^2 - 0,21\alpha + 1,02 \quad (5)$$

$$\Delta K_{45^\circ} = \Delta K_{90^\circ} (0,9335 - 0,0045\alpha + 0,1295\alpha^2 - 0,4845\alpha^3) \quad (6)$$

Las velocidades de propagación obtenidas para ambos tipos de probeta se encuentran en la zona de Paris ($da/dN > 10^{-8}\text{ m/ciclo}$). Se realizó un ajuste mediante mínimos cuadrados de los puntos $da/dN - \Delta K$ a una expresión de tipo Paris, obteniéndose los valores del coeficiente C y el exponente m .

3. RESULTADOS

Tras finalizar los ensayos, se procedió al análisis de las probetas agrietadas para la obtención de las curvas de calibración a vs V (ver fig. 4), y de ahí a vs N . A partir de dichos pares de valores $a - N$ se calcularon los valores de da/dN frente a ΔK para el Inco 718 a 550°C .

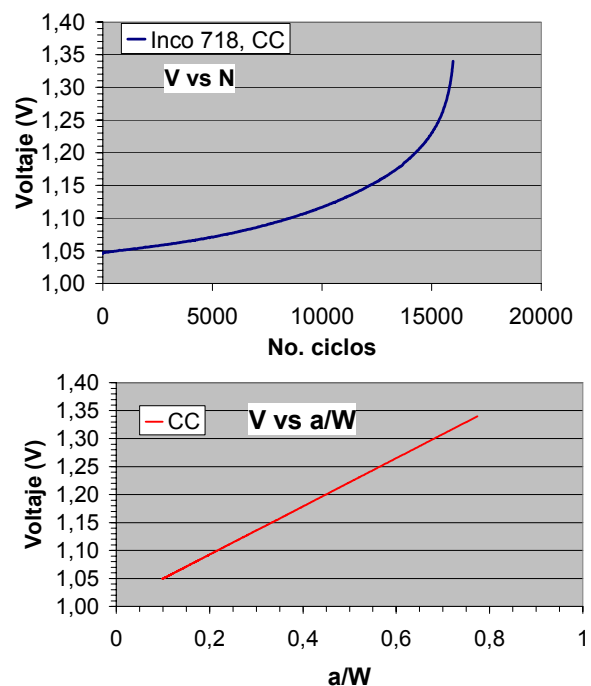


Fig. 4. Curvas V frente a N y V frente al valor $\alpha = a/W$ para una probeta CC (probeta CC1).

En la Fig. 5 se muestran la geometría y los tamaños relativos de los dos tipos de probetas ensayadas. En las superficies de fractura quedan claramente definidas las distintas zonas (entalla mecanizada, grieta inicial, grieta crecida a 550° C, y zona de crecimiento de grieta por fatiga y desgarro dúctil a temperatura ambiente). En la Fig. 6 se dan detalles de las grietas en corner.

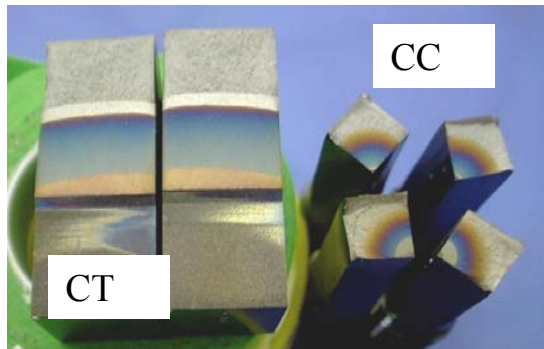


Fig. 5. Comparativa de tamaños y geometrías de grieta estudiadas en los ensayos da/dN vs ΔK a 550°C. (1,5 X)

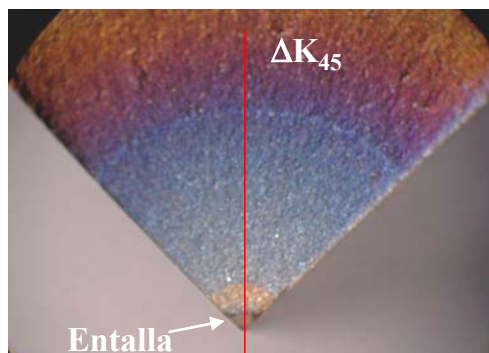


Fig. 6. Geometría de la grieta Corner Crack, CC (6,5X)

Las curvas de propagación para dos de estas probetas, se muestra en la Fig. 7. Como queda de manifiesto en dicha figura, la grieta “corner crack” crece a velocidades inferiores que la grieta pasante de la probeta CT prácticamente en todo el intervalo de valores de ΔK ($\Delta K > 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Por tanto las estimaciones de vida a fatiga de este material basadas en las leyes de propagación obtenidas con probetas CT son conservadoras.

El ajuste de la zona lineal permite la obtención de los parámetros C y m de la ecuación de Paris (Tabla 1) cuando ΔK se expresa en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ y da/dN en m/ciclo. Este ajuste se ha realizado con el software ESACRACK.

Tabla 1. Coeficientes de la ecuación de Paris

	C	m
CC	1,47E-10	2,25
CT	5,50E-10	2,62

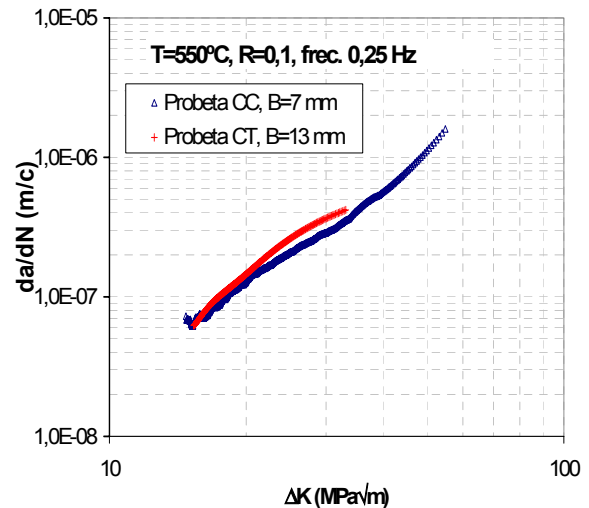


Fig. 7. Curvas de propagación para las dos geometrías de probeta.

Las superficies de fractura en la zona en la que la grieta ha crecido por fatiga se han evaluado en el microscopio electrónico de barrido. Se ha encontrado que los mecanismos de fractura operantes para ambos tipos de probeta son similares, y corresponden a un crecimiento de grieta transgranular, plano y amorfo, típico de la zona de Paris. No existen indicios de los detalles microestructurales del material, lo que descarta la contribución de mecanismos de creep.

En aquellas zonas correspondientes a velocidades de propagación del orden de 10^{-6} m/ciclo la superficie de fractura está cubierta por estrías. A medida que la longitud de grieta aumenta se da también una colaboración de mecanismos estáticos, con la aparición de cavidades dúctiles que han nucleado en partículas. La Fig. 8 muestra la superficie de fractura de una probeta CC.

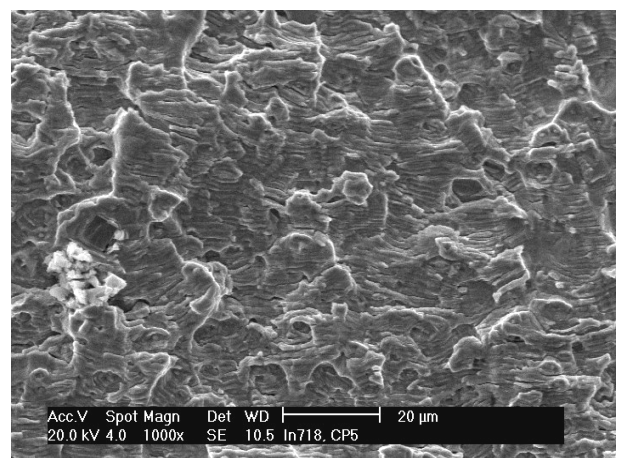


Fig 8. Fractografía de una probeta CC ($a_{45}=4,2 \text{ mm}$, $1,610^{-6} \text{ m/c}$, y $\Delta K 55,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

4. DISCUSIÓN

Las diferencias en los resultados obtenidos para ambos tipos de probetas se pueden analizar teniendo en cuenta diversos factores, como son la evolución del factor ΔK con la longitud de grieta, el nivel de tensiones actuante sobre la sección resistente, el tamaño de la zona plástica, y la relación entre el tamaño de grieta y los parámetros microestructurales. A esto hay que sumar el efecto que el tamaño y geometría de la grieta tienen sobre el estado de tensiones y deformaciones en la punta de la grieta.

Experimentalmente se ha encontrado que la variación en el voltaje con el n° de ciclos es mayor para la probeta CC que para la probeta CT a pesar de que el crecimiento de grieta sea aproximadamente de 0,8 mm a 4,2 mm para la probeta CT y de 8 a 15,5 mm para la probeta CT (ver Fig. 9)

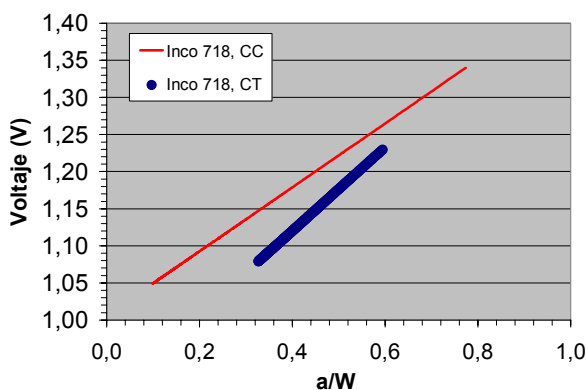


Fig 9. Variación de la señal de voltaje a lo largo del ensayo en las probetas CC y CT.

Por otro lado las curvas de propagación indican que la variación en el valor de ΔK experimentado en la punta de la grieta a medida que ésta crece es mayor en la probeta CC que en la probeta CT; Es decir, la fuerza impulsora para la propagación es mayor en la probeta CC, aunque esto no se traduzca en un mayor valor de la velocidad de propagación.

Haciendo uso del software NASGRO dentro de la herramienta ESACRACK desarrollada por la ESA [6], que incluye, entre otras, las dos geometrías de grieta, CT y CC, se ha calculado para cada una de ellas de forma analítica la variación en ΔK con el parámetro a/W , introduciendo los valores de las dimensiones de las probetas y de ΔP aplicado en el ensayo.

A modo de ejemplo la Fig. 10 incluye la geometría de la grieta CC y el resultado numérico para el valor de K_c , expresado en $\text{Mpa}\sqrt{\text{mm}}$.

Realizando dicho cálculo para ambas geometrías se ha podido comprobar que a igualdad del valor de a/W el valor de ΔK para la probeta CC es superior en entre un 70 y un 85% al valor de ΔK para la probeta CT. En la

Fig. 11 se puede observar como ambas curvas divergen en todo el rango de a/W .

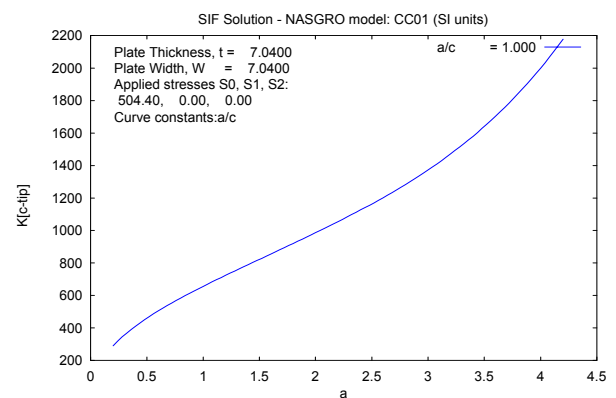
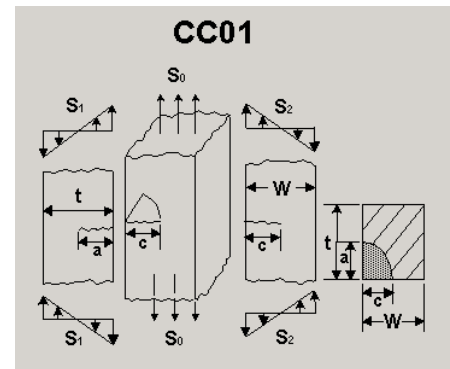


Fig 10. Cálculo analítico de K haciendo uso de NASGRO

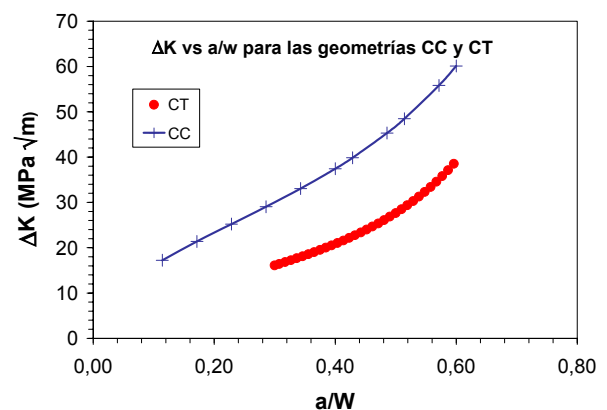


Fig 11. Evolución de las curvas de ΔK frente a a/W para las geometrías de grieta CT y CC.

Además del valor de ΔK , otro parámetro que varía de forma distinta a lo largo del ensayo para ambas probetas es la tensión actuante en la sección resistente. En la Fig. 12 se muestran los cambios en el parámetro S_n/S_{ys} (cociente entre la tensión en la sección neta del ligamento sin agrietar y el límite elástico del material) con el valor de a/W y, por tanto, de ΔK en la punta de la grieta. Se ponen de manifiesto dos comportamientos distintos: en la probeta CT en todo el rango de vida la

sección no agrietada no alcanza un valor de tensión elástica igual 0,5 veces el límite elástico, mientras que en el caso de la probeta CC ya desde el comienzo el material delante de la grieta está soportando una tensión algo mayor que 0,5 veces el límite elástico, y en los estadios finales lo supera (llega a ser hasta 1,3 veces el valor de Sys).

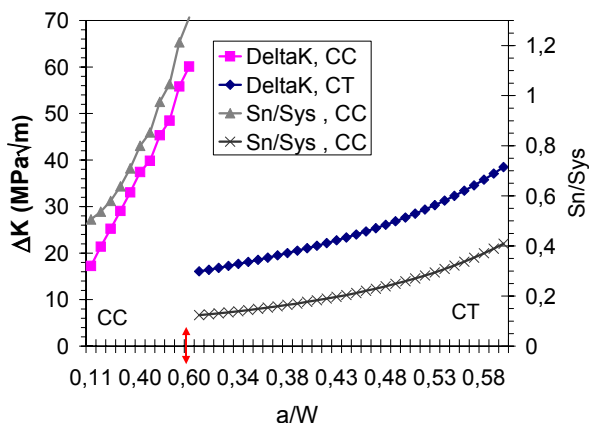


Fig. 12 . Evolución de ΔK y de la tensión en el ligamento para las dos geometrías de probeta.

Otro de los parámetros que difiere entre ambas geometrías de probeta es la relación entre el tamaño de grieta y el tamaño de la zona plástica. Mientras que en la probeta CC que contiene una grieta físicamente corta (<1 mm) al inicio, el tamaño de la zona plástica está entre el 4 y el 9% de la longitud total de grieta, en la probeta CT oscila entre el 0,3 y el 1% de la longitud total de grieta. El no. de granos máximo contenido por la zona plástica oscila entre unos 30 para la probeta CC y unos 12 para el caso de la probeta CT.

La diferencia de tamaños entre ambos tipos de probeta, y las restricciones al crecimiento derivadas de las distintas geometrías (grieta en corner frente a grieta pasante) traen consigo una variación en el campo de tensiones y deformaciones en la punta de la grieta. La superficie agrietada en la probeta CC es del orden del 15% de la de la probeta CT. Otro factor a añadir es el valor de la tensión actuante en la sección para ambos tipos de probeta. Todos estos factores actúan dando lugar a un crecimiento relativo de grieta en la probeta CC inferior al observado en la probeta CT.

5. CONCLUSIONES

La técnica ACDP resulta adecuada para monitorizar el crecimiento de grietas por fatiga a elevada temperatura (550°C) en probetas de tipo CC y CT en una aleación base níquel.

La sensibilidad de la señal ΔV vs ΔN y la linealidad en la respuesta ΔV vs Δa permite la obtención de curvas a , N con un no. de puntos experimentales suficiente para

deducir las curvas da/dN - ΔK a partir de las expresiones analíticas propuestas por las normas.

Las curvas da/dN vs ΔK obtenidas para las dos geometrías de probeta ponen de manifiesto que el valor de da/dN para la probeta CC es inferior al de la probeta CT para el mismo valor de la fuerza impulsora ΔK .

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al personal de Testing Area en **Rolls-Royce plc.**, Derby (Reino Unido) el soporte técnico recibido para la puesta a punto de la técnica A.C.P.D. para la medida indirecta de la longitud de grieta.

REFERENCIAS

- [1] ASTM E647-99, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates"
- [2] "Small-Crack Test Methods", ASTM STP 1149, (Ed. Larsen, J. M., Allison, J.E.), ASTM, 1992.
- [3] Pickard, A.C., Brown, C.W, and Hicks, M.A., "The Development of Advanced Specimen Testing and Analysis Techniques Applied to Fracture Mechanics Lifting of Gas Turbine Components", en *Advances in Life Prediction Methods* (Ed. Woodford, D.A., and Whitehead, J.R.), ASME, New York 1983.
- [4] Saka M. et al, "Measurement of Stress Intensity Factor by means of AC Potential Drop Technique", *Experimental Mechanics*, 31, 209-219,(1991 (3)).
- [5] PrEN 3873-01 "Determination of Fatigue Crack Growth Rates using Corner-Cracked (CC) Test Pieces" , Aerospace series, Test Methods for Metallic Materials.
- [6] ESACRACK v. 4.0, Feb. 2000, "Prediction of Load Spectra, Fracture, and Fatigue Analysis" , developed by ESA/ESTEC/TOS-MCS.