

FATIGA EN CALIENTE DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ METÁLICA Y REFUERZO UNIDIRECCIONAL Ti64/SiC.

M.C. García Leiva¹, I. Ocaña¹, A. Martín Meizoso¹, J.M. Martínez Esnaola¹,
V. Marqués², F. Heredero²

¹Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT)
Pº Manuel de Lardizábal, 15, 20018- San Sebastián

y
Escuela Superior de Ingenieros (Univesidad de Navarra)
Aptdo. 1674, 20080, San Sebastián

²Laboratori General d'Assaigs i Investigacions (LGAi)
Ctra. d'accés a la Facultat de Medicina de la U.A.B.
08290 Cerdanyola del Vallés (Barcelona)

Resumen: Los materiales compuestos de matriz metálica son materiales de gran interés en aplicaciones aeronáuticas. En concreto los materiales compuestos de matriz de Ti reforzados con fibras largas de SiC se están estudiando para su utilización en turbinas de aviación por sus excelentes propiedades mecánicas a relativamente elevadas temperaturas. El material utilizado en este estudio ha sido un compuesto de matriz Ti/6%Al/4%V reforzado unidireccionalmente con 8 capas de fibras de SiC. En esta comunicación se presenta un estudio del proceso de fractura por fatiga a las temperaturas en las que se prevé que puedan ser utilizados este tipo de materiales (concretamente 550°C y 600°C). Se presenta también el estudio fractográfico de las probetas rotas a esta temperaturas, lo que permite determinar el mecanismo de nucleación y propagación hasta la fractura final de las probetas.

Abstract: Metal matrix composites are materials with great interest in aeronautic applications. Ti matrix composites reinforced with continuous SiC fibres are being studied for use in turbine engines due to their excellent properties at high temperatures. The material employed in the present work is a Ti6Al4V matrix composite unidirectionally reinforced with 8 plies of a SiC fibre. In this paper the fatigue fracture process is studied at the operation temperatures planned for these materials (550°C and 600°C). Fractography of the tested samples at both temperatures is also presented. Thus, the mechanisms of nucleation and propagation until fracture can be predicted.

1. INTRODUCCIÓN

En las tres últimas décadas el empleo de materiales compuestos se ha ido generalizando en los más variados campos de aplicación: aeronáutica, ingeniería naval, automoción, deporte de competición, etc. Debido a las propiedades sinérgicas de estos materiales compuestos, se nos presenta una amplísima variedad de posibilidades, en cuanto a propiedades y aplicaciones, las cuales sólo se ven limitadas por motivos económicos, medioambientales y la inventiva de los investigadores. En el campo concreto de la aeronáutica, donde el peso es un factor económico crítico, los materiales compuestos han encontrado múltiples aplicaciones. Sin embargo, en ciertas partes de los aviones, como los motores, su aplicación se ve limitada por las propiedades a altas temperaturas. En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento a fatiga en caliente (550°C y 600°C) del material compuesto de matriz metálica Ti64 (aleación de titanio $\alpha+\beta$ con un 6

% en peso de aluminio y un 4% de vanadio) reforzado con fibras continuas de SiC. Estas temperaturas corresponden a las que se encuentran en la zona media del compresor de las turbinas. El empleo de material compuesto Ti64/SiC supondría una reducción en peso de los discos del compresor de aproximadamente el 75%.

2. MATERIAL ENSAYADO

El material empleado en los ensayos de fatiga en caliente a 550°C y 600°C es un material compuesto de matriz metálica Ti64 reforzado unidireccionalmente con fibras continuas de SiC (fracción volumétrica de fibra en el material compuesto 35%). Dichas fibras vienen dispuestas en 8 capas formando una distribución hexagonal en la matriz. Dicho material fue adquirido de la DRA, Reino Unido, presentando la matriz una

microestructura de granos pequeños (unas 10 micras) y equiaxiales, como muestra la Fig. 1.

Los valores de las resistencias a tracción, deformaciones y módulos elásticos de este material a 550°C y 600°C se presentan en la Tabla 1.

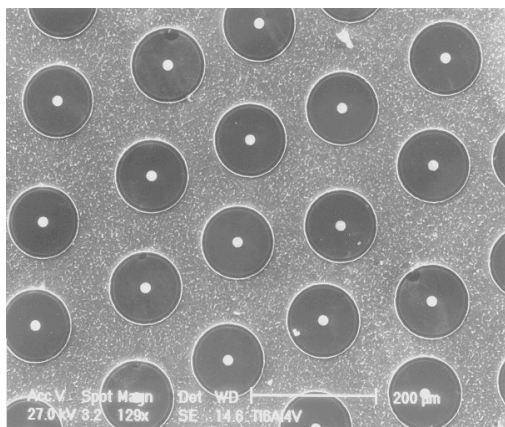


Fig. 1. Sección del material compuesto empleado en los ensayos de fatiga.

Tabla 1. Valores de resistencias a tracción, deformación a fractura y módulos elásticos para Ti64/SiC ensayado a temperatura ambiente, 550°C y 600°C.

T (°C)	tensión de rotura (MPa)	deformación (%)	E(GPa)
23	1547	0.958	186.8
550	1194	0.833	160.1
	1212	0.861	164.3
600	1178		154.3
	1146	0.862	149.9
	1108	0.805	152.8

3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Se han realizado ensayos de fatiga en aire a dos temperaturas (550°C y 600°C). Para ello se montaron probetas rectangulares (200 x 5 x 1.3) mm, cargadas en la dirección del refuerzo en una máquina servohidráulica MTS. Las probetas se ensayaron en un horno de resistencias utilizando un sistema de mordaza fría para el amarre y monitorizando la temperatura del centro de la probeta con un termopar tipo S.

Se realizaron ensayos para diferentes niveles de carga manteniendo en todos ellos una relación carga máxima/mínima por ciclo, $R = 0.1$ y una frecuencia de 1 Hz. Los ensayos se mantuvieron durante un número máximo de 200000 ciclos.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para los ensayos de fatiga realizados a 550°C y 600°C se presentan en la Tabla 2. En dicha tabla aparece la temperatura del ensayo, las diferentes cargas empleadas y el número de ciclos. La Fig. 2 representa estos datos junto con datos de la bibliografía [1,2].

Tabla 2. Resultados de los ensayos de fatiga para distintas condiciones de temperatura y carga.

probeta	T (°C)	σ_{uts} (Ti64/SiC) (MPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{máx}} / \sigma_{\text{uts}}$ (%)	nº ciclos
1	600	1144	583	51	>200000
2			686.8	60	>200000
3			801	70	109650
4			859.4	75.1	33150
5			951.18	83.1	23500
6			985.09	86.1	9240
9	550	1203	677.1	56.3	>200000
8			776.36	64.5	160509
7			796.27	66.2	49650
10			884.1	73.5	43550

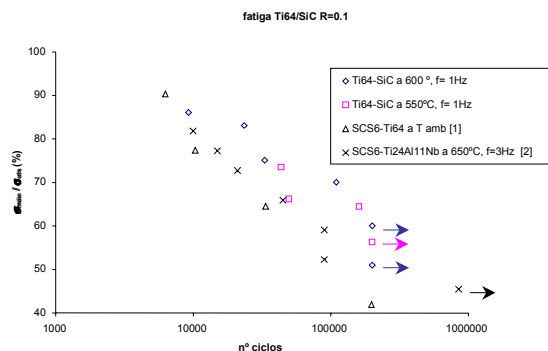


Fig. 2. Carga (en porcentaje respecto a la carga de rotura correspondiente a esa temperatura) frente al número de ciclos.

5. FRACTOGRAFÍA

5.1 Superficies de fractura

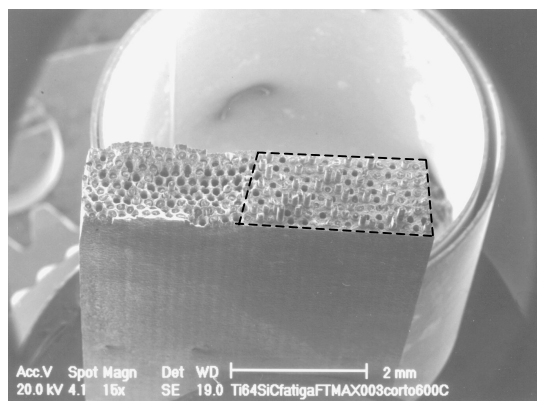


Fig. 3. Micrografía electrónica de barrido de la superficie de fractura de un material compuesto Ti64/SiC. Ensayo de fatiga a 600°C con una tensión máxima de 801 MPa.

La Figura 3 presenta el aspecto típico de una probeta rota en los ensayos de fatiga: En la superficie de fractura se observa una zona plana, correspondiente a la propagación de la grieta en fatiga, y una más rugosa, correspondiente al régimen de rotura estática. En la

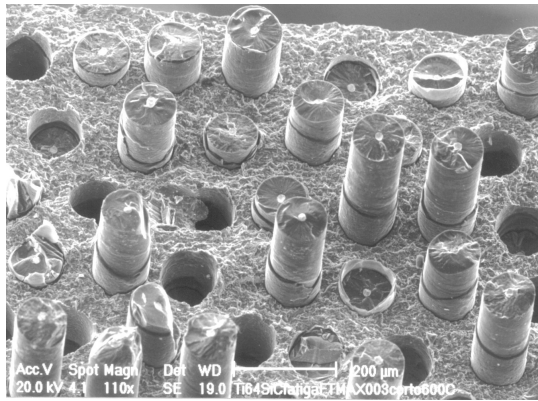


Fig. 4. Detalle de la Fig. 3 de la zona plana (propagación inicial en fatiga).

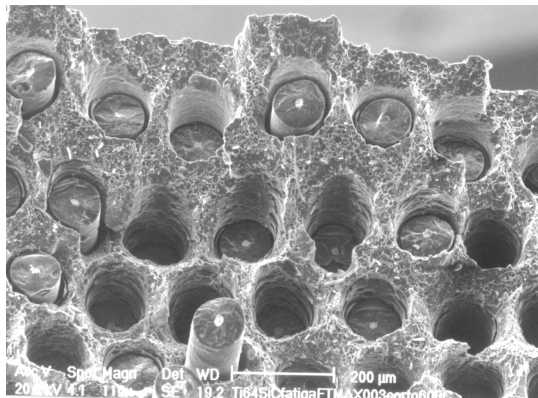


Fig. 5. Detalle de la Fig. 3 de la zona no plana (rotura estática). Se observa labio de cortadura en la parte superior.

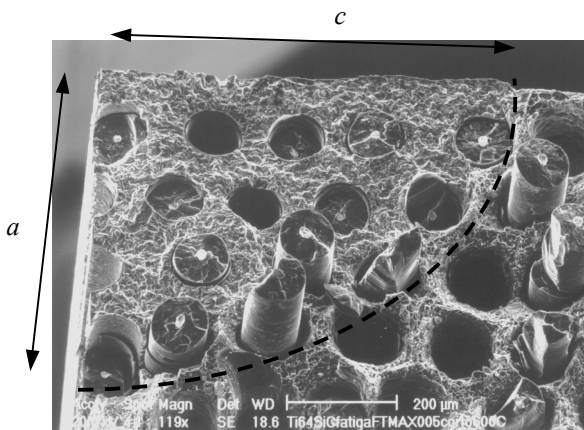


Fig. 6. Detalle de la zona de iniciación de la fractura y parte de la zona de rotura estática del material Ti64/SiC ensayado a fatiga a 600°C y 951.18 MPa de tensión máxima.

En la tabla 3 se presentan los porcentajes de las zonas de rotura a fatiga y zona de rotura estática respecto de la superficie total de fractura, para cada una de las probetas ensayadas.

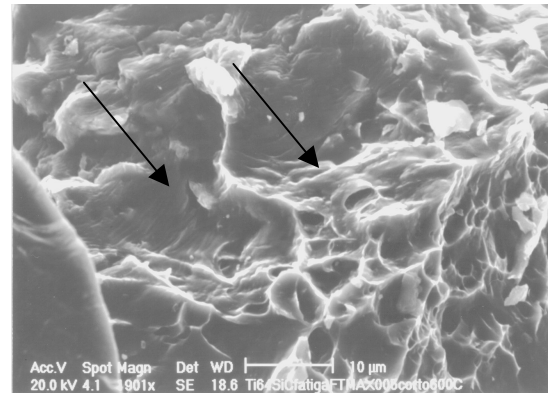


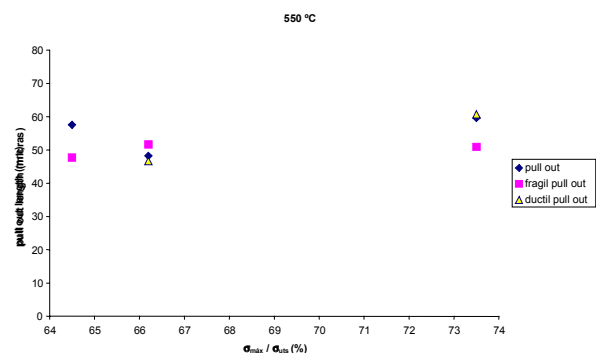
Fig. 7. Detalle de la zona de transición de Fig. 6. Se observan las bandas de deformación perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta.

Tabla 3. Porcentajes de las distintas zonas de las superficies de fractura para distintas condiciones de temperatura y carga.

probeta	T (°C)	extremo	fatiga (%)	estática (%)
3	600	corto	50.8	49.2
		largo	50.2	49.8
4		corto	14.7	85.3
		largo	14.6	85.4
5		corto	5.4	94.6
		largo	4.7	95.3
6		corto	0	100
		largo	0	100
8	550	corto	90.1	9.9
		largo	90.7	9.3
7		corto	29.4	70.6
		largo	30	70
10		corto	11.9	88.1
		largo	9.8	90.2

5.2 Longitud de extracción de las fibras

Sobre las superficies de fractura se midieron las longitudes de extracción de las fibras ("pull out"). En estas medidas se ha distinguido entre longitudes de extracción para la zona plana y la dúctil. Dichos resultados se presentan en la Fig. 8.



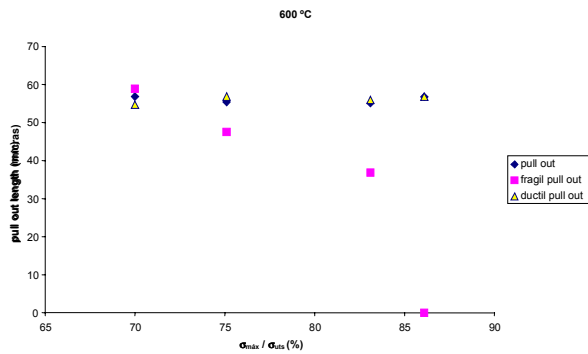


Fig. 8. Longitud de extracción para la zona plana, la dúctil y el conjunto de la superficie.

Las longitudes de extracción de la zona plana las hemos representado en forma de histograma de frecuencias y se ha realizado el ajuste a una distribución de Weibull, como muestra en la Fig. 9 para las probetas de 550°C. Para 600°C las curvas presentan aspectos similares.

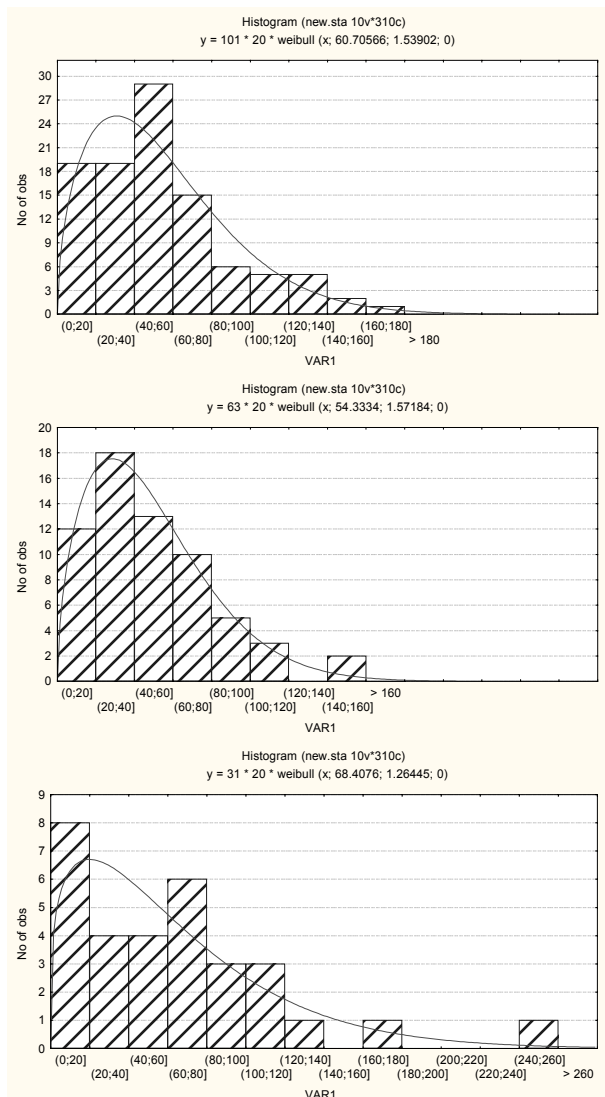


Fig. 9. Histogramas de frecuencias de las longitudes de extracción de la zona plana de las probetas ensayadas a 550 °C y cargas de 776.4, 796.3 y 884.1 MPa, respectivamente.

6. DISCUSIÓN

6.1 Mecanismos de rotura

El inicio de la rotura por fatiga (superficie de rotura plana) se presenta en el borde de la probeta, bien desde la arista, bien desde uno de los laterales. Dicha rotura es la típica para una probeta de la misma geometría sometida a tracción y compresión alternada [3].



Fig. 10. Esquema del inicio y propagación de la rotura por fatiga para una probeta con la geometría dada.

La superficie de fractura de las probetas de fatiga presenta dos zonas diferenciadas, como ya se ha mencionado en el apartado 5.1: una zona plana (rotura a fatiga) y una dúctil (rotura estática).

La zona de rotura a fatiga presenta la matriz rota transgranularmente, como lo hace el Ti64 sin refuerzo en ensayos de fatiga (Fig. 11).

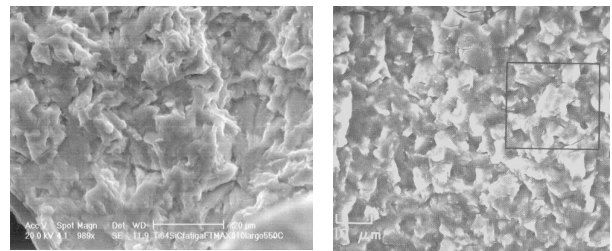


Fig. 11. A la izquierda detalle (550°C y 884.1 MPa) de la matriz de Ti64 del material compuesto en la zona plana. A la derecha detalle (689 MPa, R = 0.1, en aire y a T amb.) de la superficie de fractura de una probeta de Ti64 rota a fatiga [4].

Por otra parte las fibras de esta zona presentan superficies de rotura (Fig. 12) semejantes a aquéllas observadas en ensayos de tracción de este tipo de fibras (Fig. 13).

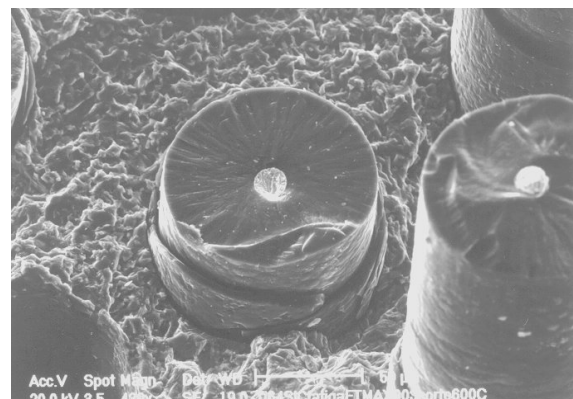


Fig. 12. Superficie típica de fractura para una fibra situada en la zona plana (600°C y 801 MPa).

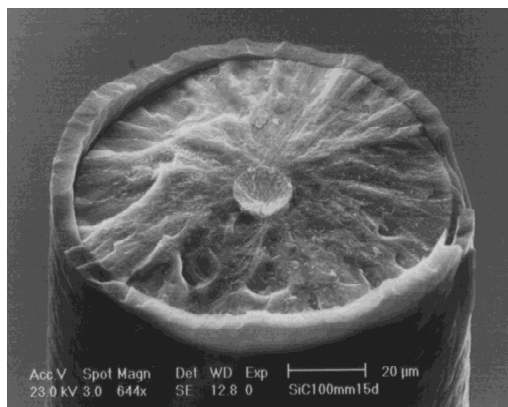


Fig. 13. Superficie típica de fractura de una fibra SiC ensayada a tracción [5].

De este hecho se puede afirmar que los mecanismos principales de rotura a fatiga en las condiciones dadas son aquéllos de la matriz de Ti64. Esta rompe progresivamente de manera transgranular, según progresa la grieta. Se produce así el puenteo de la grieta por las fibras, es decir las superficies opuestas de la grieta quedan en un primer momento unidas por las fibras que romperán cuando la grieta se abra y se alcancen las condiciones de tensión suficientes para que rompan. Su fractura es así semejante a la obtenida de un ensayo de tracción de una fibra.

A medida que va creciendo la grieta de fatiga, la sección eficaz de la probeta disminuye, luego las tensiones efectivas en dicha sección aumentan. De esta manera se llega al momento, como se observa en el mapa de mecanismos de fractura para el Ti64 en la Fig. 14, en que se pasa de rotura transgranular a dúctil, entrando en la zona de rotura estática. En esta zona, la matriz de Ti64 presenta cavidades dúctiles. Las fibras presentan superficies de rotura como las de la zona plana, en algunos casos. En otros, la rotura de las fibras es aparentemente distinta, como se muestra en la Fig. 15, presentándose extracción del núcleo de W respecto del SiC.

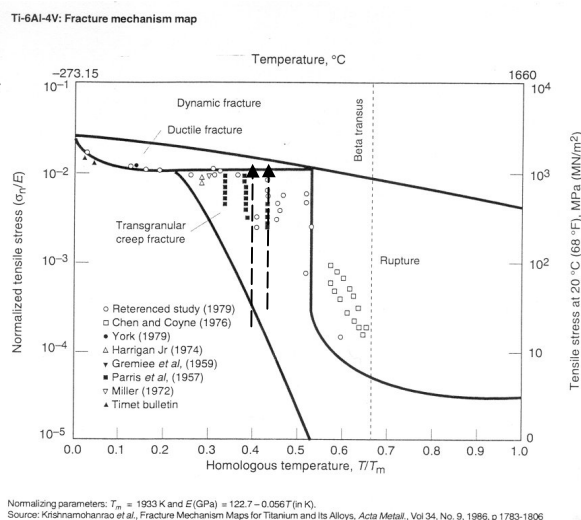


Fig. 14. Mapa de macanismos de fractura para el Ti64. Las flechas indican el camino recorrido durante los ensayos para ambas temperaturas [6].

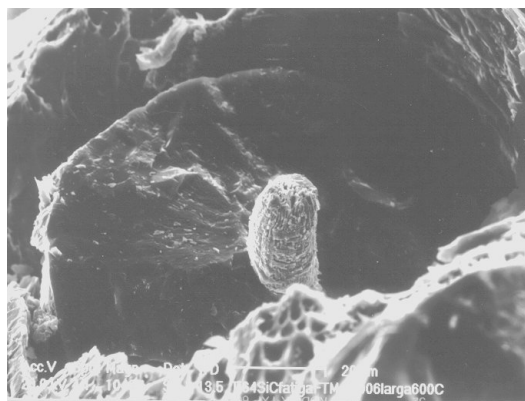


Fig. 15. Superficie de fractura para una fibra situada en la zona dúctil (600°C y 985.09 MPa).

La rotura de la zona dúctil es semejante a las superficies de fractura de probetas a tracción del material compuesto Ti64/SiC a las temperaturas 550°C y 600°C (Fig. 16), incluyéndose en dicho comportamiento el "pull out" del núcleo de W, "pull out" que no se observa en ensayos de tracción a T ambiente.

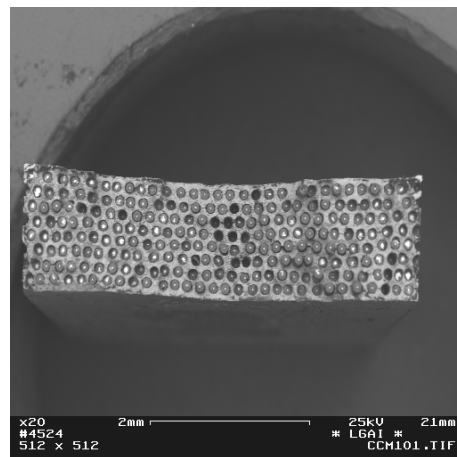


Fig. 16. Superficie de fractura para Ti64/SiC sometido a tracción en caliente (550°C).

6.2 Longitud de extracción de fibras

Los valores medios de longitud de extracción son iguales para todas las cargas, dentro del margen de error experimental. A 600°C se observa que a mayor carga tenemos menos longitud de extracción en la zona plana; mientras que la longitud de extracción general y la de la zona no plana se mantienen constantes. A 550°C se observa que todas las longitudes de extracción son constantes. Sin embargo hay que fijarse que los porcentajes en carga son menores que para el caso de 600°C y que quizás con porcentajes en carga correspondientes a los ensayos a 600°C mostrarían una disminución de la longitud de extracción en la zona plana al aumentar la carga.

En las distribuciones de Weibull se observa un desplazamiento (del pico) hacia longitudes mayores para tensiones menores, lo cual es coherente teniendo en

cuenta que a menores tensiones el defecto necesario para romper la fibra es mayor, la probabilidad de encontrarlo menor y, por tanto, la probabilidad de que el defecto esté más lejos de la grieta de fatiga mayor, es decir, la longitud de extracción será mayor a menor carga (Fig. 17).

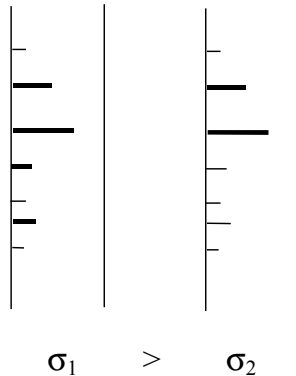


Fig. 17. Esquema en el que se presentan dos fibras sometidas a dos tensiones diferentes. A mayor tensión más probabilidades de que se active algún fallo que lleve a la fibra a rotura (en negrita las grietas activas para la tensión aplicada).

Además los ciclos de fatiga degradan las intercaras fibra/matriz, por ello es de esperar que a mayor número de ciclos, decaiga el valor de la tensión de deslizamiento, es decir, que aumenten las longitudes de extracción.

6.3 Tenacidad K_I

A partir del tamaño de la zona plana que aparece en la superficie de fractura de la probeta, es posible estimar la tenacidad. Se han empleado las expresiones:

cuando la rotura se produce desde el borde:

$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2W}} \quad (1)$$

donde

a es la longitud de la grieta (longitud de la zona de fatiga), y
 W es la longitud de la probeta

cuando la grieta inicial tiene forma de cuarto de elipse:

$$K_I = 1.12 \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi} \sqrt{4 \sqrt{\sin^2 \varphi + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \varphi} \sec \frac{\pi a}{2W}} \quad (2)$$

donde

φ es el ángulo paramétrico del punto del frente de la grieta, y

$$\Phi \approx \sqrt{1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}} \quad c \geq a \quad (3)$$

la aproximación que normalmente se emplea de la integral elíptica completa de segunda especie.

Tabla 4. Valores de tenacidad para las probetas con zona plana. Dicha zona proporciona la longitud de grieta, a (y c).

probeta	T (°C)	tensión (MPa)	a (mm)	W (mm)	c (mm)	K (MPa√m)
3	600	801	2.51	5.08		79.66
4		859.4	1	5.2	1.15	36.68
5		951.18	0.68	5.08	0.75	32.82
8	550	776.36	2.67	4.81		79.64
7		796.27	1.46	5.24		60.4
10		884.1	0.95	5.27	1.02	35.58

Los valores de tenacidad se encuentran ligeramente por encima del mínimo aceptable para la mayoría de las aplicaciones ≈ 20 MPa√m, siendo los valores mínimos 33 MPa√m a 600°C y 36 MPa√m a 550°C.

Considerando que los valores de K_I para la matriz de Ti64 [3] a temperatura ambiente se sitúan en valores de entre 60 y 100 MPa√m para ensayos en distintas condiciones (variaciones en las cargas, contenido en oxígeno, características microestructurales, etc), y teniendo en cuenta que estos valores en tenacidad se ven reducidos hasta valores 30-50 MPa√m tras someter al material a distintos tratamientos térmicos, se puede afirmar que, a pesar de la presencia de las fibras de SiC en la matriz de Ti64, las propiedades de la matriz del material compuesto se mantienen en cuanto a la tenacidad, para las temperaturas de estos ensayos de 550°C y 600°C.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la CICYT (Fondos FEDER) por su apoyo económico al proyecto 2FD97-0089-CO2, en el cual se ha enmarcado el trabajo aquí presentado.

8. REFERENCIAS

- [1] E.D. de los Ríos, C.A. Rodopoulos, J.R. Yates. "Modelling the conditions for fatigue failure in metal matrix composites", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* **19** (1996) No. 9, 1093-1105.
- [2] T. Nicholas, S.M. Russ. "Elevated temperature fatigue behavior of SCS-6/Ti-24Al-11Nb", *Materials Science and Engineering*. **A153** (1992) 514-519.
- [3] V.J. Colangelo, F.A. Heiser. *Analysis of Metallurgical Failures*. Ed. John Wiley & Sons, 154.
- [4] ASM International. *Metals Handbook*. Vol. 9. *Fractography and atlas of fractographs*. 8th Edition (1974), 275.
- [5] M.C.García-Leiva, I.Ocaña, A.Martín-Meizoso, J.M.Martínez-Esnaola. *Fracture Mechanics of Sigma SM1140+ fibre*. Euroconference High Performance Fibres. (19-26 oct. 2000). Mallorca.
- [6] ASM International. *Materials Properties Handbook*. Titanium Alloys. (June 1994), 581-588.