

Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería en Materiales 2021

EFECTO DE LA MICROESTRUCTURA EN EL COMPORTAMIENTO DEL Ti-6Al-4V
BAJO CONDICIONES EXTREMASS. Perosanz¹, M. Viscasillas¹, N. Martín Piris¹, M. Hokka², D. Barba¹¹Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid.
sergio.perosanz.amarillo@alumnos.upm.es²Impact-Multiscale Mechanics Research Group, Engineering Material Science, Tampere University.

Resumen: Los componentes de los motores aeroespaciales deben soportar condiciones extremas de altas temperaturas y cargas dinámicas. Una de las aleaciones más extendidas que se utilizan en reactores comerciales es Ti-6Al-4V. Las propiedades dinámicas de Ti-6Al-4V dependen del estado de la microestructura y las condiciones de temperatura. Además, esta aleación presenta diferentes microestructuras según el componente y los métodos de fabricación. En este trabajo, comparamos la respuesta de cinco microestructuras de Ti-6Al-4V ensayadas bajo condiciones estáticas y dinámicas, y diferentes temperaturas. La respuesta macroscópica de la aleación se modeliza basándose en su estado microestructural utilizando caracterización por microscopía combinada con simulación computacional. Para ello, se han ajustado y validado modelos elasto-plásticos computacionales con los ensayos experimentales. De esta manera, se puede extraer la relación entre las propiedades mecánicas de cada microestructura y las condiciones de temperatura y velocidad de deformación para optimizar el estado del material en las condiciones dinámicas específicas enservicio.

Palabras clave: Titanio, Impacto, Microestructuras, FEM, Optimización.

1. INTRODUCCIÓN.

Una de las aleaciones más extendidas utilizadas en las etapas de compresor es el Ti-6Al-4V [1]. Las propiedades a impacto del Ti-6Al-4V dependen en gran medida de la microestructura y las condiciones de temperatura, por ello es vital tener conocimiento de ellas. A su vez, esta aleación puede presentar una amplia variedad de microestructuras según el componente y los métodos de fabricación [2]. En este trabajo, comparamos la respuesta de cinco microestructuras de Ti-6Al-4V diferentes probadas en condiciones estáticas y dinámicas a diferentes temperaturas. La respuesta macroscópica se relaciona con el estado microestructural usando caracterización microscópica combinada con modelado computacional. También se han validado modelos computacionales elasto-plásticos basados en el modelo de Johnson-Cook. De esta forma se puede extraer la relación entre las propiedades mecánicas de cada microestructura y las condiciones de temperatura y velocidad de deformación con el objetivo de optimizar el material en condiciones de impacto [3].

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

2.1 Material y condiciones de ensayo.

El material estudiado en este trabajo es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ Ti-6Al-4V. Se recibió en estado de Mill-Annealing en forma planchas de 3 mm y 19 mm de espesor.

Las condiciones de ensayo, tanto dinámicas como estáticas, para los diferentes tratamientos térmicos se presentan en la Tabla 1.

Para los ensayos dinámicos, se han utilizado probetas planas de longitud calibrada 12 mm y sección de 3 mm.

Tabla 1. Condiciones de ensayo utilizadas en el estudio.

Condición de ensayo	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	Temp. (°C)
Estático, baja temperatura (C1)	0.001	25
Estático, alta temperatura (C2)	0.001	500
Dinámico, baja temperatura (C3)	500	25
Dinámico, temperatura media (C4)	500	200
Dinámico, alta temperatura (C5)	500	400

Para los ensayos estáticos se han empleado probetas cilíndricas extraídas de la plancha de 19 mm de diámetro 5 mm y longitud calibrada de 14 mm. La geometría de las probetas de alta y baja temperatura es la misma, ya que el método de calentamiento fue por horno convencional.

2.2 Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos llevados a cabo en este estudio son los resumidos en la Tabla 2 y en la Figura 1. Estos tratamientos fueron elegidos debido a que son los más comunes aplicados a la aleación Ti-6Al-4V.

Tabla 2. Detalles de los tratamientos térmicos llevados a cabo.

Tratamiento térmico	T ₁ (°C)	t ₁ (h)	Enf.	T ₂ (°C)	t ₂ (h)	Enf.
Recocido $\alpha+\beta$ (ABA)	940	1	Aire	675	4	Aire
Recocido β (BA)	1025	0.5	Aire	730	2	Aire
Solución y maduración (STA)	940	1.5	Agua	540	4	Aire
Solución y sobremaduración (STOA)	940	1.5	Agua	675	4	Aire

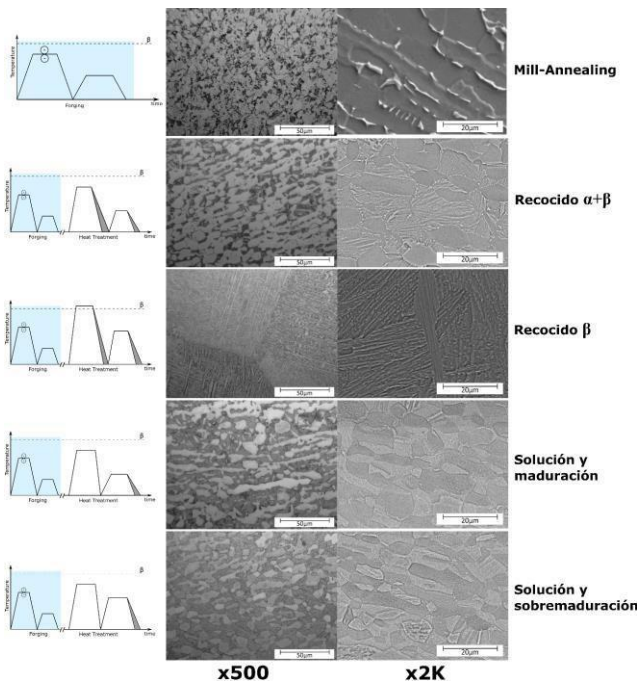


Figura 1. Tratamientos térmicos utilizados en el estudio.

2.3 Ensayos estáticos.

Para el desarrollo de los ensayos, se empleó una máquina de ensayos universal MTS modelo 810 con una célula de carga de 100 kN junto con unas mordazas hidráulicas de agarre para probetas cilíndricas.

Para la medición de la extensión se utilizan dos métodos. Un extensómetro MTS modelo 632.25C-20 con longitud base calibrada de 25 mm; y un sistema de correlación digital de imagen desarrollado en el laboratorio formado por una cámara FLIR Blacfly BFS- U3-13Y3C-C junto con un software de adquisición y tratamiento de imagen en tiempo real desarrollado con el módulo Vision Development de LabVIEW [4]. Para controlar y registrar los datos del ensayo se empleó un módulo control de Servosis.

2.4 Ensayos dinámicos.

Los ensayos dinámicos se han llevado a cabo bajo diferentes temperaturas en un equipo de ensayos de barra Hopkinson a tracción diseñado y construido en el departamento de ciencia de los materiales de la Universidad de Tampere [5].

Para las pruebas a alta temperatura, el calentamiento se realizó mediante efecto Joule, provocado por la corriente eléctrica que atraviesa la probeta. Esta corriente se aplica antes del ensayo mediante dos electrodos de cobre. Estos se retiran justo antes del inicio del ensayo para no afectar a los resultados. Un termopar tipo K fue soldado para medir la temperatura durante el ensayo.

3. METODOLOGÍA COMPUTACIONAL.

A la hora de modelizar el comportamiento mecánico se recurrió al modelo viscoplástico de Johnson-Cook, que define la respuesta de la tensión en los metales en función de la temperatura, la velocidad de deformación y el endurecimiento por deformación. La tensión plástica σ ,

según el modelo de Johnson-Cook, sigue la ecuación:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

donde A, B, C, n, m son parámetros del material. La temperatura adimensional T^* se define como $T^* = (T - T_{room}) / (T_f - T_{room})$, donde T_{room} es la temperatura ambiente y T_f la temperatura de fusión del material.

En términos de daño, el modelo asume que la deformación plástica equivalente al inicio del daño es una función de la triaxialidad de la tensión y la velocidad de deformación. Se emplea para predecir la aparición de daño debido a la nucleación, crecimiento y coalescencia de microvacíos en metales dúctiles. El modelo sigue la siguiente ecuación:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - d_5 T^*) \quad (2)$$

4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.1 Ensayos mecánicos

El efecto de las condiciones de ensayo se ve reflejado en una clara disminución del límite elástico y la resistencia del material a medida que aumenta la temperatura de ensayo en condiciones dinámicas y estáticas (Figura 2). En términos de efectos microestructurales, para las condiciones de temperatura ambiente hay un efecto claro de la microestructura sobre la resistencia y más pronunciado sobre la ductilidad de la aleación, en concordancia a los estudios de Jha et al. [6].

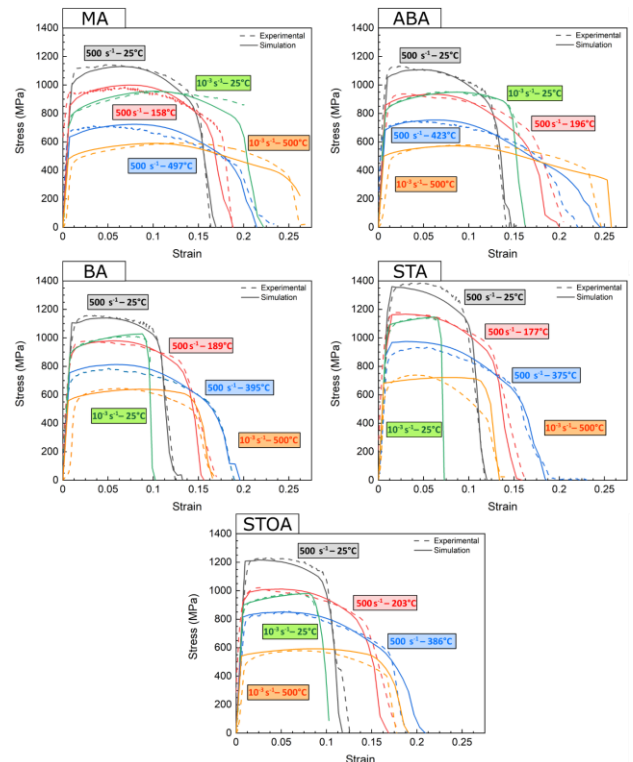


Figura 2. Comparación de las curvas tensión-deformación experimentales y las simulaciones.

En los tratamientos MA y ABA, se puede observar cómo los ensayos estáticos a baja temperatura presentan una deformación a rotura mayor que los dinámicos a la misma temperatura. Este fenómeno ocurre al contrario en el resto de las microestructuras, en las cuales la deformación a rotura de la condición dinámica es sustancialmente mayor que la estática, presentando un comportamiento anómalo.

Durante las cargas dinámicas ocurren dos efectos en paralelo. Por una parte, se produce un endurecimiento debido a las altas velocidades de deformación. Por otro lado, se produce un calentamiento local adiabático inducido por la deformación plástica que radica en un ablandamiento por aumento de la temperatura. Por lo que se puede observar, en la Figura 2, el comportamiento frente a estos dos efectos varía en función de la microestructura existente.

4.2 Fractografía

Para comprender mejor ese comportamiento anómalo de las microestructuras BA, STA y STOA las superficies de fractura de las microestructuras se han examinado para analizar el modo de fallo en las diferentes condiciones de ensayo. Para poder comparar las diferencias se analizan las microestructuras ABA, BA y STA, que presentan distintos comportamientos.

A la hora de analizar los microvacíos existentes, se puede ver cómo el tamaño de estos en las condiciones dinámicas es mayor en el caso de las microestructuras BA y STA, como muestra la Figura 3.

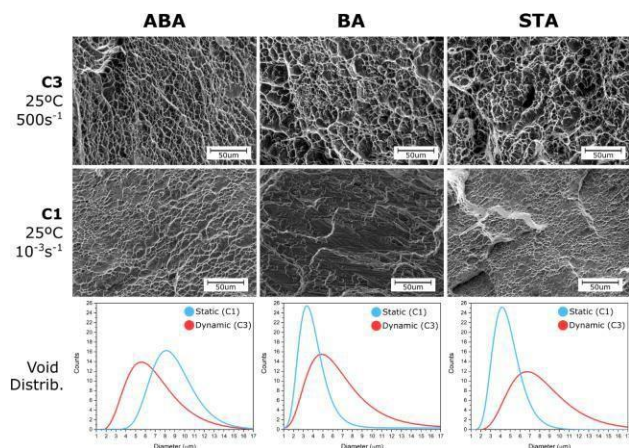


Figura 3. Análisis de las superficies de fractura a 500 aumentos y distribuciones del tamaño de las cúpulas de las distintas microestructuras.

Esto está originado por el calentamiento local adiabático que induce la deformación plástica a altas velocidades de deformación. Este calentamiento es suficiente para modificar el modo de fallo en estas microestructuras de frágil o semi dúctil a dúctil. Por otro lado, las cúpulas que se forman en la microestructura ABA durante la condición dinámica C3 son de menor tamaño, tal y como se puede ver en los gráficos de la Figura 4.

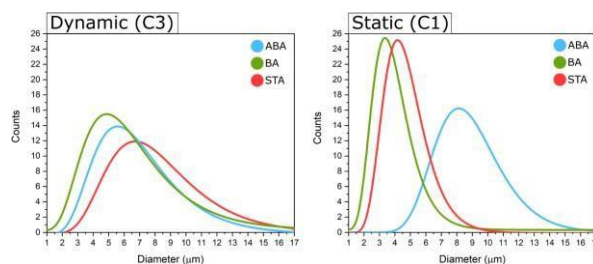


Figura 4. Comparación del tamaño de las cúpulas entre las diferentes microestructuras ante las condiciones estáticas y dinámicas a temperatura ambiente.

En ella, se muestran las distribuciones de los diámetros máximos de Feret de las cúpulas. Estas distribuciones están calculadas a través del software de imagen AIS 5.0 [3], detectando las cúpulas como partículas y haciendo el tratamiento a través de análisis de imagen. Todas estas razones refuerzan la idea de que la microestructura ABA tiene un comportamiento en el que predomina el endurecimiento por velocidad de deformación frente al ablandamiento por calentamiento local, efecto contrario al que sufren las microestructuras BA, STA y STOA

5. RESULTADOS COMPUTACIONALES.

Para modelizar el comportamiento mecánico reflejado en los ensayos experimentales se han utilizado los modelos de Johnson-Cook.

Las Tablas 3 y 4 reflejan los parámetros utilizados en el modelizado según las ecuaciones (1) y (2) definidas en la metodología. La velocidad de deformación de referencia elegida es $10^{-3} s^{-1}$.

Tabla 3. Parámetros del modelo de JC.

	A(MPa)	B(MPa)	C	n	m
MA	732	780	0.022	0.53	0.78
ABA	800	700	0.020	0.60	0.75
BA	880	780	0.015	0.65	0.79
STA	1080	910	0.018	0.88	0.8
STOA	890	780	0.025	0.8	0.75

Tabla 4. Parámetros de daño del modelo de JC.

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
MA	0.55	0.8	0.6	-0.028	1.2
ABA	0.22	0.65	0.6	-0.022	4.9
BA	0.11	0.2	0.6	0.03	4.9
STA	0.05	0.2	0.6	0.07	4.5
STOA	0.13	0.18	0.6	0.01	7

Los resultados computacionales obtenidos de los modelos de elementos finitos 3D se comparan con el comportamiento experimental en la Figura 5.

Los resultados muestran una buena concordancia con los ensayos experimentales, tanto en el comportamiento plástico, como en la respuesta al daño.

Como ya se ha comentado anteriormente se espera que este calentamiento local sea el factor principal que contribuya al aumento de ductilidad observado en condiciones dinámicas.

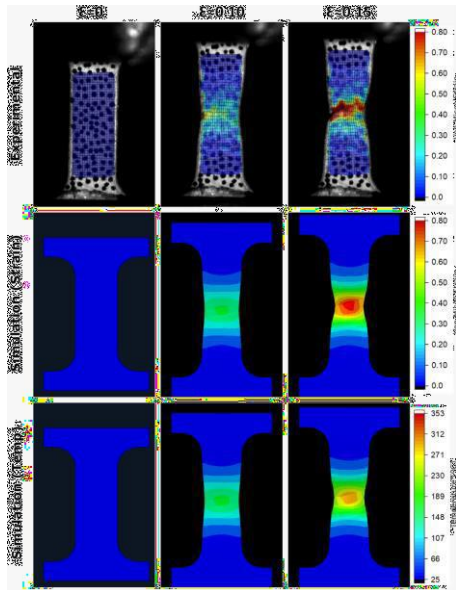


Figura 5. Distribución de la deformación experimental y computacional para la condición C3 del tratamiento ABA (arriba), y la distribución de temperatura extraída de la simulación (abajo).

Una vez calibrados los modelos para todas las microestructuras, se ha realizado un conjunto de 25 simulaciones con diferentes condiciones de ensayo para cada microestructura. Estas condiciones de contorno se encuentran en rangos de velocidad de deformación de 10^{-3} a 500 s^{-1} y temperaturas de 25°C a 500°C . En la Figura 6 se muestran los mapas de límite elástico, resistencia a tracción y deformación a rotura para cada microestructura en función de la temperatura y velocidad de deformación.

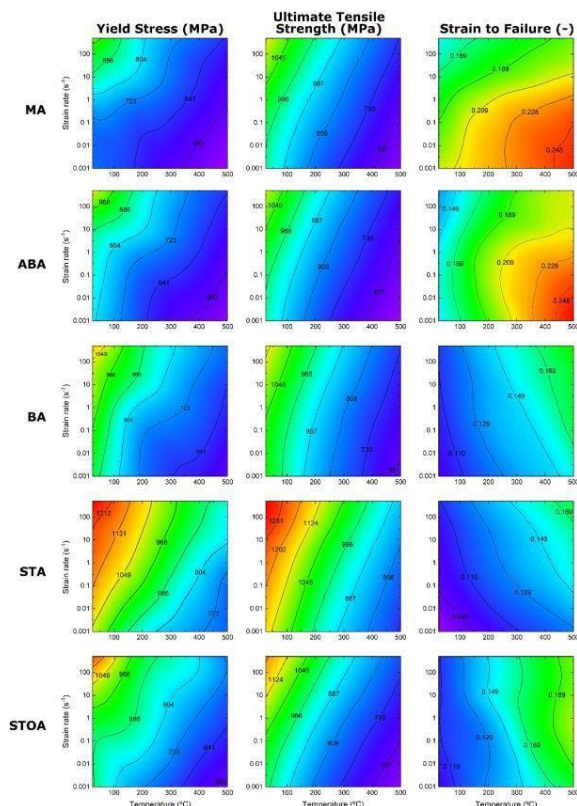


Figura 6. Mapas de límite elástico, resistencia mecánica y deformación a rotura de las diferentes microestructuras estudiadas en función de la temperatura y velocidad de deformación.

Todos los mapas de límite elástico y resistencia mecánica presentan una tendencia similar. Cuanto menor sea la temperatura y mayor sea la velocidad de deformación más alta es la tensión.

En los mapas de velocidad de deformación se pueden observar dos tendencias principales, una en la que el máximo se encuentra a bajas velocidades de deformación y alta temperatura (MA y ABA); y otra en la que el máximo se encuentra a alta velocidad de deformación y temperatura con una tendencia lineal (BA y STA). Sin embargo, el mapa de la microestructura STOA no se corresponde a ninguna de las dos tendencias. Es debido a que en el proceso de sobremaduración se tiende a recuperar la microestructura bimodal original, lo cual provoca que la tendencia del mapa de deformación a rotura esté a medio camino entre STA y ABA, por lo que las simulaciones reflejan adecuadamente los efectos de endurecimiento por velocidad de deformación y el de ablandamiento por calentamiento local adiabático.

6.- CONCLUSIONES.

En la caracterización mecánica se ha observado como las microestructuras BA, STA y STOA presentan un comportamiento anómalo. Este efecto es atribuido al calentamiento local adiabático que se produce en estas condiciones. El estudio de la fractografía ha reflejado el efecto del calentamiento local adiabático que sufren las probetas en régimen dinámico. Este efecto es más pronunciado en aquellas microestructuras que presentan mayor ductilidad a altas velocidades de deformación. Finalmente, las simulaciones reflejan que el efecto del calentamiento local es el responsable del comportamiento anómalo ya que las microestructuras BA, STA y STOA son más susceptibles al ablandamiento por calentamiento local que al endurecimiento por velocidad de deformación.

9.- REFERENCIAS

[1] P. Rolls-Royce, The jet engine, vol. 574, no. 7779. 2015.
 [2] Y. Jin, "A Review of Research on Bird Impacting on Jet Engines," {IOP} Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 326, p. 12014, Mar. 2018, doi: 10.1088/1757-899x/326/1/012014.
 [3] S. Perosanz et. al. "On the effect of the microstructure on the impact behavior of Ti6-Al-4V". 13th Conference on Mechanical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, DYMAT 2021.
 [3] S. Perosanz, "DIC-LEM Software," 2021. <https://www.perform-upm.com/resources> (accessed Jun. 20, 2021).
 [4] M. Hokka, K. Östman, J. Rämö, and V.-T. Kuokkala, "High Temperature Tension HSB Device Based on Direct Electrical Heating," in Dynamic Behavior of Materials, Volume 1, Springer, 2015, pp. 227–233.
 [5] J. S. Jha, S. P. Toppo, R. Singh, A. Tewari, and S. K. Mishra, "Deformation behavior of Ti-6Al-4V microstructures under uniaxial loading: Equiaxed Vs. transformed- β microstructures," Mater. Charact., vol. 171, p. 110780, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110780.