

OPTIMIZACIÓN DEL CONFORMADO DE UNA SUPERALEACIÓN EXPERIMENTAL

Jaime Llanea Fernández¹. Arisbel Cerpa Naranjo². Manuel Carsí³

¹Alumno del Máster Universitario en Ingeniería Industrial, Universidad Europea de Madrid

²Departamento de Ingeniería Industrial y Aeroespacial. Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño.
Universidad Europea de Madrid

³Departamento de Metalurgia Física CENIM-CSIC, Madrid. carsi@cenim.csic.es

Resumen: En el presente trabajo se estudian los parámetros de conformado de una superaleación con alto contenido en cromo y níquel introduciendo un 0.9% de Ti e incrementando el C hasta 0,2% en masa. El material resultante presenta una microestructura de granos equiaxiales de unas 300 μm . Después de diferentes tratamientos termomecánicos simulados con ensayos de torsión se observa un afino de grano con tamaños de unas 6-10 μm con pequeñas partículas de TiC. Las propiedades mecánicas a alta temperatura de esta aleación se estudiaron mediante ensayos de torsión a temperaturas comprendidas entre 850 y 1200°C. Los resultados de estos ensayos se analizaron utilizando la ecuación de Garofalo. Los valores que se obtuvieron para la F de Snedecor y el coeficiente de regresión garantizan que los datos puedan ser correlacionados por una única ecuación. Se encontró un valor para la energía de activación para la deformación plástica más elevada que la energía de autodifusión del hierro a través de la red austenítica y un exponente de la tensión muy superior a 5, lo cual sugiere que la deformación del material está controlada por un mecanismo de movimiento de dislocaciones que alcanza rápidamente la zona exponencial.

Palabras clave: Superaleación, Conformado, Ecuación de Garofalo, Ecuación de Liapunov.

Abstract: In the present work, the conformation parameters of a superalloy with a high content of chromium and nickel are studied, introducing 0.9% of Ti and increasing the C up to 0.2% by mass. The resulting material presents a microstructure of equiaxed grains of about 300 μm . After different thermomechanical treatments simulated with torsion tests, a grain refinement with sizes of about 6-10 μm with small TiC particles is observed. The high-temperature mechanical properties of this alloy were studied by torsion tests at temperatures between 850 and 1200 ° C. The results of these tests were analyzed using the Garofalo equation. The values that were obtained for the Snedecor F and the regression coefficient guarantee the data can be correlated by a single equation. A value for the activation energy for the plastic deformation was found to be higher than the self-diffusion energy of the iron through the austenitic network and an exponent of the tension much higher than 5, which suggests that the deformation of the material is controlled by dislocation climb mechanism that quickly reaches the exponential zone.

Keywords: Superalloy, Forming, Garofalo's equation, Liapunov's equation.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones Fe-Cr-Ni han sido ampliamente utilizadas en el último medio siglo como material estructural en una gran variedad de aplicaciones que exigen alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, los aceros inoxidable austeníticos usuales tienen el inconveniente de no alcanzar elevados valores de resistencia, que cae aún más trabajando a elevadas temperaturas. En este trabajo se ha propuesto una forma efectiva de mantener la resistencia a las mencionadas temperaturas mediante la introducción de una distribución de partículas finas de segunda fase distribuidas homogéneamente en la matriz. La precipitación de partículas de segunda fase en aleaciones Fe-Cr-Ni incluye la adición de una cierta cantidad de elementos intersticiales, carbono y/o nitrógeno, y elementos estabilizadores de carburos [1,2], donde los carburos M₂₃C₆ son las partículas

endurecedoras preferidas. Las fabricadas se basaron en acero austenítico, tipo AISI 304. Elementos con alta afinidad con el carbono y el nitrógeno, como el titanio, se introducen para promover el precipitado intragranular de carburos MC, carbonitruros y nitruros [3,4]. Esta investigación está dirigida al estudio de las temperaturas y comportamiento mecánico de 30Ni-20Cr inoxidable dopado con Ti y nitrógeno. Basado en la consideración del peso atómico relativo del titanio y del Carbono, el contenido de titanio requerido para estabilizar el TiC es aproximadamente cuatro veces el contenido de carbono. Así, para un Contenido de Ti de 0,9% será necesario un contenido de carbono de aproximadamente 0,2% en peso. La relativamente baja ductilidad de este tipo de material y la alta sensibilidad a los parámetros de conformado nos han llevado a estudiar los valores óptimos de temperatura y velocidad de deformación para conseguir un semiproducto sin grietas.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

La composición fue la siguiente (% en masa): 38.07Ni – 20.6Cr -0,58Mn - 0,5Al - 0,9Ti - 0,1Si - 0,03C-0,009N, balance de Fe. Las microestructuras del material recibido y después de la deformación se estudiaron mediante microscopía óptica y electrónica de barrido.

En las figuras 1-3 se aprecia la evolución de la estructura tanto por efecto térmico como termomecánico.

Se puede apreciar que a 950°C no se ha producido una recrystalización dinámica completa despues de torsionar hasta rotura mientras que a 1200 se ha conseguido una recrystalización con una estructura de grano fino ($\approx 6 \mu\text{m}$) y carburos de Titanio del mismo orden (Figura 3). Las propiedades mecánicas a temperatura elevada se estudiaron mediante ensayos de torsión. Se llevaron a cabo ensayos en caliente a velocidades de deformación comprendidas entre 2 y 20 s^{-1} en el intervalo de temperaturas desde 850 hasta 1250 °C. La tensión equivalente y la deformación se calcularon a partir del par experimental usando la relación de Fields y Backofen [5].

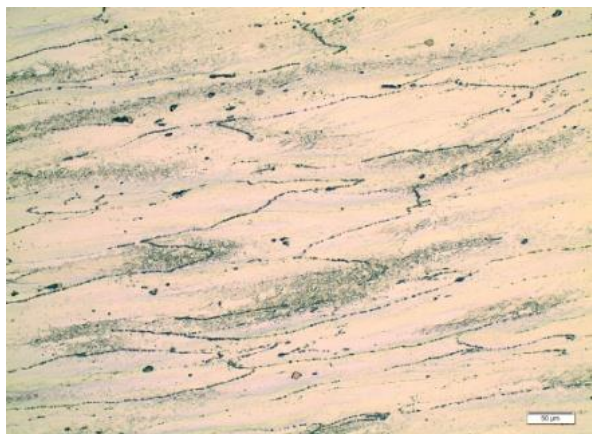
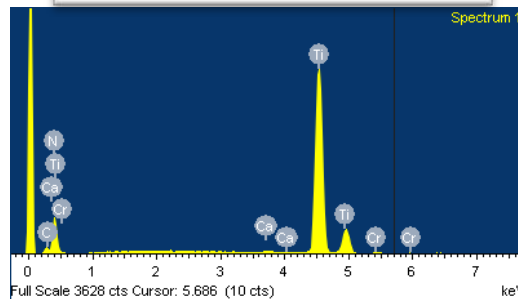
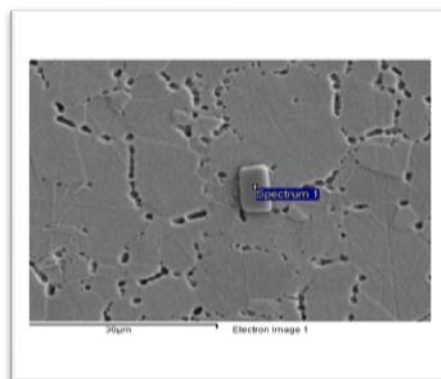


Figura1. Material torsionado a 4s^{-1} , 950°C.



Figura 2. Material torsionado a 4s^{-1} , 1200°C.



Figuras 3a y 3b. Microestructura y espectro de EDX de una partícula de CTi.

Para estudiar el comportamiento del material en un amplio rango de condiciones es conveniente utilizar la ecuación de Garofalo [6,7,8]. Solución inicial:

$$\dot{\epsilon} \cdot e^{\frac{Q}{RT}} = A \cdot [\sinh(\alpha \cdot \sigma)]^n \tag{1}$$

en la cual el primer término es el parámetro de Zenner Hollomon

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \tag{2}$$

Para que estos algoritmos alcancen una solución fiable es importante partir de una solución inicial lo más cercana posible a la final. En este trabajo se ha utilizado un algoritmo ad hoc que minimiza el error entre los resultados experimentales y los que proporciona la ecuación en función de los valores posibles de α . Este método parece el adecuado ya que α determina la dispersión de valores de Z y suele tener valores en torno a 0.01 e inferiores a 0.1 [9,10]. Con los datos experimentales se ha obtenido una solución inicial única de valor $\alpha=0.0063$. Los valores son bastante buenos considerando las diferentes correlaciones.

Para visualizar el resultado pasamos de R3 a R2 mediante el cambio

$$(Z = \dot{\epsilon} \cdot e^{\frac{Q}{RT}})$$

así podemos representar LnZ frente a LnSenh($\alpha\sigma$) a partir de la solución obtenida (Tabla 1):

$$\ln \dot{\epsilon} \cdot \exp(369000/2T) = \ln \exp(26.9 \text{Senh}(0.004\sigma))^{9.11}$$

Tabla 1.

α óptimo	ln(A)	n	Q/R cal/mol	maxerr	mse	R(ln(epsilon))	R(1/T)	R(ln(sinh(...)))
0.0041	26.9	9.11	44369.3	0.649702	0.0881051	0.896449	0.988114	0.990546

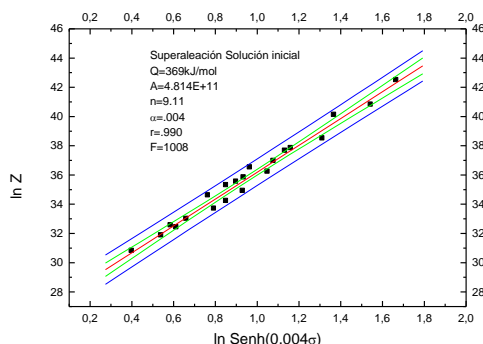


Figura 4. Solución Inicial.

A partir de la solución inicial obtenida y mediante otro algoritmo iterativo [6] obtenemos la solución que consideramos definitiva:

$$\epsilon \cdot \exp(382.000/2T) = \exp(27.62 \text{Senh}(0.0042\sigma))^{9.2}$$

$$r=0.991, F=1068$$

Como se puede apreciar los valores son del mismo orden pero la correlación y F de Snedecor son superiores en la solución final lo que garantiza una mejor adecuación de la ecuación al comportamiento del material.

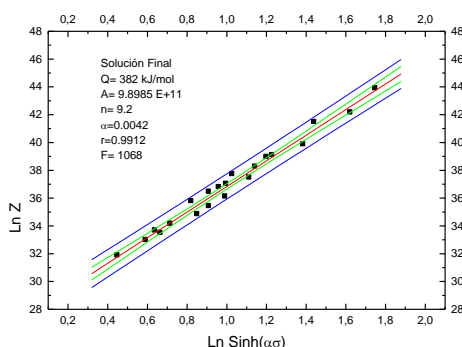


Figura 5. Solución final

El paso siguiente es calcular las condiciones optimas de conformado, para ello utilizamos la segunda ley de Liapunov, L_2 que determina la estabilidad entrópica del sistema [11],

$$L_2 = \left(\frac{\delta S}{\delta \ln \mathcal{E}} \right)_{\Gamma, \sigma} < 0 \tag{3}$$

siendo S una función de ϵ , T.

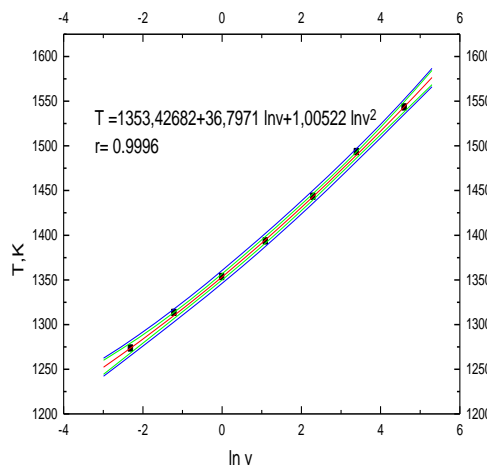


Figura 6. Valores óptimos de conformado (T,v)

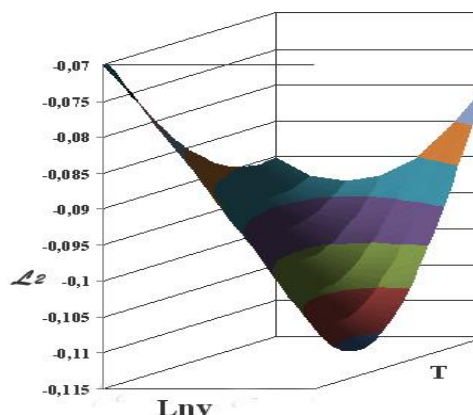


Figura 7. Superficie de la 2ª función de Lyapunov

En este trabajo se ha utilizado el programa excel que proporciona los resultados de las figuras 6 y 7 correspondiente a los valores mínimos de la superficie generada (figura7). Por ejemplo a la velocidad de 10 s^{-1} , -0,09735 corresponde una temperatura de tratamiento de 1443 K.

3. CONCLUSIONES

La adición de Titanio ha mejorado las propiedades de la aleación inicial.

La segunda ecuación de Lyapunov permite optimizar los parámetros de conformado.

La ecuación de Garofalo reproduce el comportamiento del material al menos en el dominio y recorrido de los ensayos.

Los paquetes comerciales junto al algoritmo iterativo desarrollado ad hoc dan información fiable en el dominio y recorrido de las variables de tratamiento.

Agradecimientos.

Este trabajo ha sido realizado con la ayuda del Proyecto MAT2015-68919-C3-1-R (MINECO/FEDER)

4. REFERENCIAS.

- [1] K. G. Brickner and I. D. Defillippi: Handbook of Stainless Steels, eds. by D. Peckner and I. M. Bernstein, McGraw-Hill, New York, (1977), 20-1.
- [2] E. Truman: Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, Vol. 7-Constitution and Properties of Steels, ed. by F. B. Pickering, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, (FRG), (1992), 527.
- [3] H. I. Harding and R. W. K. Honeycombe: J Iron Steel Inst., 204 (1966), 259.
- [4] F. H. Froes and D. H. Warrington: Trans. Metall. Soc. AIME, 245 (1969), 2009.
- [5] D. S. Fields and W. A. Backofen: Am. Soc. Test. Mater. Proc., 57 (1957), 1259.
- [6] C. García, M. Carsí, F. Peñalba y M.P. de Andrés. "Structure-Thermomechanical parameters relationship and Zener-Hollomon equation for two vanadium microalloyed steels"; J. Mater. Sci., 27, 17 (1992) 4567-4576.
- [7] M. Carsí, F. Peñalba, I. Rieiro, F. Zapirain y O.A. Ruano "Hot forging of a Cu-Al-Ni-Fe-Mn alloy and its simulation by torsion testing", Z. Metallkd. 91(2000) 1057-1062.
- [8] M. Carsí, F. Peñalba, I. Rieiro, O. A. Ruano "High temperature workability behaviour of a modified P92 steel", Int. J. Mat. Res. (formerly Z. Metallkd.) 102 (2011) 11, 1378-1383.
- [9] F. Garofalo "An empirical relation defining the stress dependence of minimum creep rate in metals" Transactions of The Metallurgical Society of AIME dec. 1963 vol 227, 1474-1477.
- [10] H.J. McQueen, N.D. Ryan "Constitutive Analysis in Hot working", Mat Sci and Eng A322 (2002) 43-63
- [11] I. Rieiro, Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Madrid (Spain) Junio, 1997.