

Capítulo 5

Conclusiones

El Trabajo aquí presentado tiene como objetivo la investigación del modo de cristalización de los vidrios metálicos $Zr_{57}Ti_5Cu_{20}Ni_8Al_{10}$ y $Zr_{57}Nb_5Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}$, hasta la aparición, en la matriz amorfa, de determinadas fracciones de volúmen de nanocristales mediante un tratamiento isotérmico de recocido. Así mismo, mediante ensayos de compresión se caracterizan las propiedades mecánicas a temperatura ambiente de las muestras tratadas mediante ensayo de compresión.

Dado que las aleaciones de composición $Zr_{57}Ti_5Cu_{20}Ni_8Al_{10}$ y $Zr_{57}Nb_5Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}$ se comportan como materiales con una gran facilidad para la formación vítrea, se produjeron barras cilíndricas con un diámetro de 3 mm y una longitud de 50 mm mediante inyección del material fundido en una coquilla de cobre. Teniendo en cuenta que un alto contenido en oxígeno facilita la cristalización en el proceso de solidificación, se le otorgó un especial valor a la limpieza de los elementos de partida. De esta forma, se consiguieron barras completamente amorfas, como se mostró mediante difracción de rayos X.

El mecanismo de cristalización de las muestras originales amorfas fue estudiado mediante calorimetría de barrido diferencial. A partir de un análisis con calentamiento continuo en el DSC, con una velocidad de calentamiento de 40 K/min, se determinaron las temperaturas de transición vítrea T_g y las de comienzo de la cristalización T_x . De esta forma queda definida la región de líquido subenfriado ΔT_x . En este análisis también se deduce la entalpía de cristalización ΔH_x . Los valores concretos obtenidos son, para la

aleación con un 5% at de Ti de 383 °C y 444 °C, para T_g y T_x respectivamente, siendo por tanto la región de transición vítrea de 61 °C, con una entalpía de cristalización de 28.83 J/g. Para el vidrio metálico con contenido en Nb, se observa T_g a 424 °C, T_x en torno a 496°C y la región vítrea es de 72 °C. El valor de la entalpía de cristalización alcanza un valor de 52.66 J/g.

Se estudia la cinética de cristalización isoterma de ambas aleaciones mediante la ecuación de Johnson-Mehl-Avrami. Los datos que se desprenden de este modelo, junto a las evidencias que surgen durante la investigación (recurriendo a técnicas como XRD, TEM y DSC), permiten describir los procesos de cristalización de nanocristales que se producen en estos dos materiales como una cristalización primaria.

A partir de la información obtenida con los experimentos anteriormente descritos, se realizan tratamientos de recocido a temperaturas en torno a la temperatura de transición vítrea T_g . De esta forma se obtienen probetas parcialmente cristalizadas. Las temperaturas empleadas para dichos tratamientos isotérmicos fueron 380 °C (3 °C por debajo de T_g) para la aleación con Ti y de 420 °C (4 °C por debajo de T_g) para la aleación de Nb.

Los ensayos de compresión realizados a temperatura ambiente dieron como resultado un valor bajo del módulo de Young para las probetas amorfas, y una elevada tensión máxima acompañada de una alta deformación plástica ideal. En el caso del vidrio $Zr_{57}Ti_5Cu_{20}Ni_8Al_{10}$ se obtuvo exactamente $E = 80$ MPa, tensión máxima 1790 MPa y una deformación plástica máxima de 1.7 %. La aleación de composición $Zr_{57}Nb_5Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}$ presenta una ligera elevación de estas propiedades con $E = 85$ MPa y una tensión de 1.850 MPa, pero con detrimento de la fluencia, con una deformación plástica de 1,3 %. Podemos decir que la aleación con Nb presenta mayor resistencia a la deformación. ($E = 85$ (Nb) > $E = 80$ (Ti))

Las probetas parcialmente cristalizadas mostraban un comportamiento en la deformación similar a la del estado amorfo. Se observa sin embargo en la aleación con Ti un aumento del módulo de Young de la matriz amorfa con la formación de nanocristales. Para el material con un 40 % en fracción de nanocristales, en relación con muestras de menor fracción de matriz amorfa transformada, existe una tendencia al aumento de la tensión máxima y de la deformación en régimen plástico. Si cotejamos estos datos con los obtenidos por Xing, el cual observa una disminución de la deformación plástica al variar el volumen cristalizado desde un 40 % hasta un 100 %, se

podría suponer que la aleación presenta un óptimo entre deformación plástica y resistencia máxima alcanzada.

El modo de fractura de las probetas ensayadas en este Proyecto se produce por la formación de una banda de deslizamiento que forman 45° con el eje de compresión. Se observan, en la superficie de rotura, unas estructuras características con forma de venas o nido de aveja, provocadas por la disminución de la viscosidad en dicha banda de deslizamiento. El tamaño de esas estructuras para las probetas amorfas es de 20 a 30 μm y se va reduciendo en probetas con un mayor contenido de nanocristales, llegando a 10 μm para la aleación con un 40 % de fracción cristalizada.

Ensayos de viscosidad realizados sobre muestras de los vidrios objetos de estudio, ponen de manifiesto la gran importancia del estudio de la viscosidad para la aplicación de técnicas de procesado tales como conformado. Para ello la baja viscosidad que presenta el líquido subenfriado permite la producción de elementos con complicadas geometrías mediante moldeo o extrusión a temperaturas relativamente bajas. Los valores aquí observados de viscosidad mínima fueron de $3 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ a una temperatura de 433°C para la composición con Ti, disminuyendo para la aleación con Nb, a $1.5 \cdot 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ a 471°C .