
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALUMINUROS DE HIERRO POR LA TÉCNICA DE NANOINDENTACIÓN

E. HUAPE-PADILLA^a, L. BEJAR-GOMEZ^a, A. MEDINA-FLORES^b, A. HURTADO-MACIAS^c.

^a Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México.

^b Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México.

^c Centro de Investigación en Materiales Avanzados A.C., CIMAV, Chihuahua, Chih., México

Introducción

Los compuestos intermetálicos son definidos como una aleación de fases ordenadas, formados entre dos o más elementos metálicos, siendo claramente diferentes de las soluciones sólidas de las aleaciones convencionales [1]. Aluminuros de hierro han sido reconocidos por poseer excelente resistencia a la oxidación y a la sulfidación, durante la década de los 30's, pero la falta de ductilidad a temperatura ambiente, baja resistencia a altas temperaturas, e insuficiente resistencia a la fluencia a alta temperatura los ha dejado sin explotar para aplicaciones comerciales, siendo Fe₃Al y FeAl los aluminuros de hierro de mayor interés. Las propiedades mecánicas de las aleaciones binarias FeAl son dependientes del contenido de aluminio. El límite elástico aumenta con el incremento del contenido de aluminio de hasta 40at%, a temperatura ambiente el porcentaje de elongación disminuye con el incremento del contenido de aluminio; también, el límite elástico del FeAl. Además, los límites de elasticidad del FeAl son insensibles al contenido de aluminio a 700°C y son demasiado bajos para aplicaciones estructurales en o por encima de 700°C. La baja ductilidad de los aluminuros de hierro requiere un trabajado en caliente por encima de los 700°C, en la práctica una temperatura de 900°C o más alta es empleada. Adiciones del 0.12at% B (300ppm) mejora la ductilidad del Fe-35.8at%Al entre 2.2-5.6%. Por otro lado, adiciones tan pequeñas como 0.06at%B resultó en grietas severas en los bordes y al final durante la laminación en caliente. Tales grietas en los bordes durante la laminación en caliente no se observaron con la adición del zirconio, el mejoramiento de la ductilidad se observó en el rango de 0.1-0.2at%Zr. Por lo tanto, el B y Zr juegan un papel importante en el mejoramiento

de la ductilidad a temperatura ambiente. La adición del molibdeno cuando se añade al mismo tiempo con el zirconio mejora la resistencia a la tensión y termofluencia, solamente se ha observado que la adición de cromo incrementa la ductilidad en temperatura ambiente del Fe₃Al [2].

Las propiedades mecánicas de estos materiales han sido examinadas en varias ocasiones, variando ampliamente para la composición cercana a Fe₃Al. La técnica de Nanoindentación ha sido ampliamente utilizada para obtener las propiedades mecánicas tales como Módulo de Elasticidad y Dureza. El presente trabajo estudia las propiedades mecánicas de los aluminuros de hierro en las composiciones Fe-28%wt.Al y Fe-17wt%.Al. Se investiga el comportamiento del módulo de elasticidad, rigidez y dureza con la variación de los porcentajes de aluminio, sin la presencia de elementos ternarios.

Metodología

Las aleaciones utilizadas en el presente trabajo se obtuvieron en botones de 20gr en un crisol de cobre enfriado por agua en una atmósfera inerte de Ar, los materiales utilizados Al y Fe presentaban purzas de 99.99% y 99.97% respectivamente. Los botones obtenidos fueron refundidos 8 veces para asegurar su homogeneidad en la composición. Las composiciones químicas se determinaron por medio de SEM-EDX (emisión de campo, JSM-7401F) ver tabla 1. La composición de las fases de las aleaciones fue determinada por DRX en un difractómetro PANalytical usando una radiación CuK α . La identificación de las fases se realizó con el programa Match. Las mediciones por nanoindentación se realizaron en las superficies pulidas de las muestras con un arreglo en una matriz de 4 x 4, para determinar las propiedades de Módulo de Elasticidad y Dureza. El equipo utilizado fue un Nano indentador marca Agilent G200 con un indentador punta de diamante tipo Berkovich con un radio de 20nm y una carga máxima de 5mN. El equipo fue calibrado con una muestra de sílice fundido estándar, siguiendo el método descrito en otra parte [3]. El análisis de las curvas carga – desplazamiento se llevó a cabo por el método de Oliver y Pharr [4].

Resultados y Discusión

Caracterización de las aleaciones FeAl

Las microestructuras de las aleaciones FeAl en sus condiciones de fundición se muestran en la figura 1. En la figura 1a), se observa la morfología equiaxial de los granos de la aleación Fe₃Al, con un tamaño de grano mayor a 500 μ m y la presencia de poros. No se observa la presencia de precipitados y segundas fases como se puede observar en el patrón DRX en la figura 2b). La microestructura de la aleación FeAl figura 1b), está compuesta por granos equiaxiales y por granos alargados, con un tamaño de grano promedio entre 100-300 μ m y con presencia de poros. La presencia de precipitados y de segundas fases no fue detectada como se puede ver en los patrones de difracción de rayos X en la figura 2a).

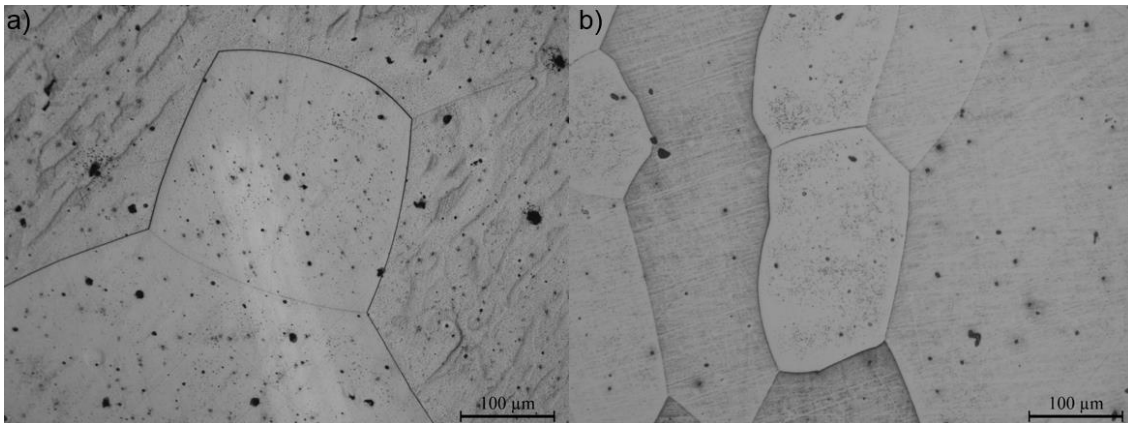


Fig. 1 Microestructuras de las aleaciones, a) Fe₃Al y b) FeAl.

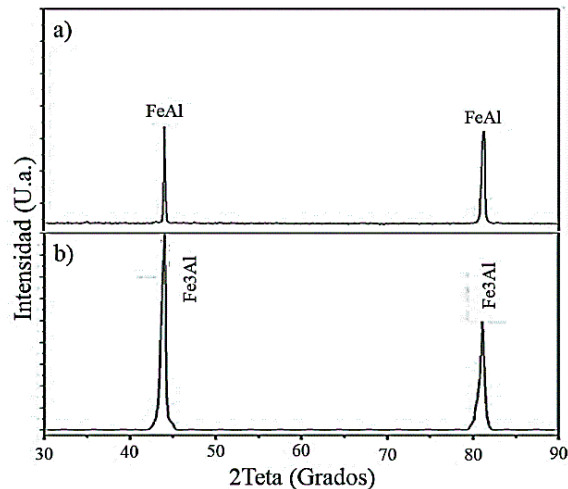


Fig. 2 Patrones de difracción de rayos X de las muestras: a) FeAl y b) Fe₃Al en condiciones de fundición.

Curvas carga – desplazamiento.

La Fig. 3, presenta las curvas carga – desplazamiento de los intermetálicos, en ellas se puede observar que la curva de carga es ligeramente igual a la curva de descarga, esto es presenta una deformación elástica, no presentan pop-in, teniendo una buena repetitividad en las 16 indentaciones realizadas. Las huellas residuales del nanoindentador no presentan irregularidades en el tamaño y forma, así como grietas, ver Fig. 4.

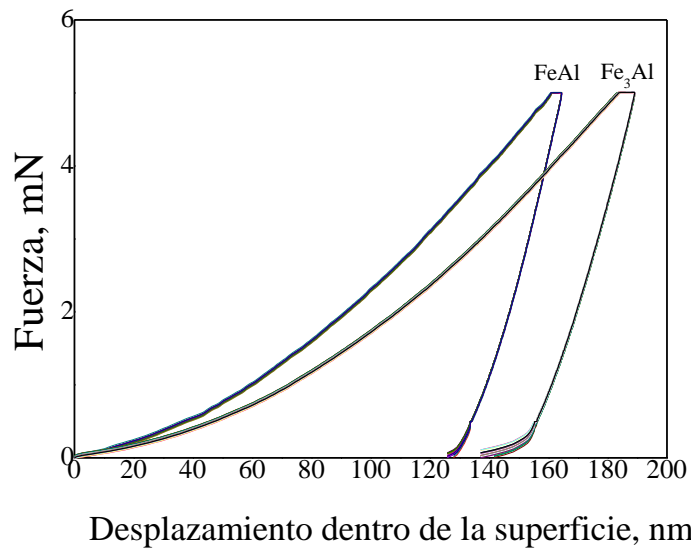


Fig. 3 Curvas carga – desplazamiento de las aleaciones FeAl y Fe₃Al.

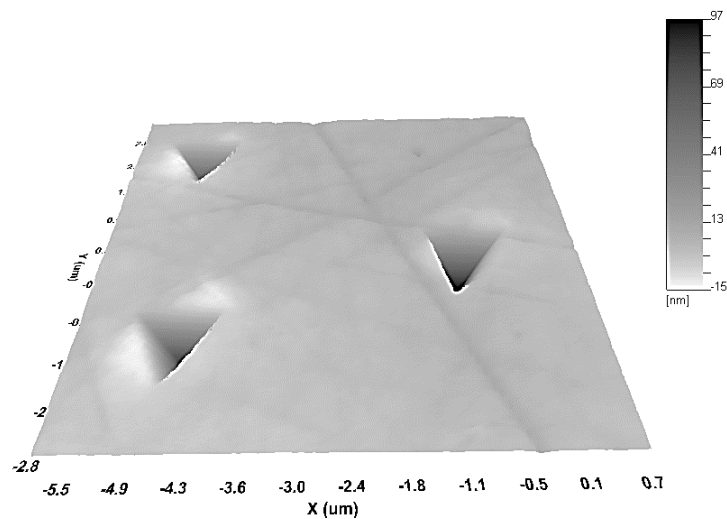


Fig. 4 Imagen de AFM de las marcas residuales.

Es bien sabido que el módulo de Young tiene gran dependencia en la composición de los intermetálicos, como se puede observar en la tabla 1, el intermetálico FeAl presenta un incremento en el módulo de Young y dureza de 20 y 22% respectivamente en comparación con el intermetálico Fe₃Al, indicando que requiere de mayor fuerza para separar los átomos y hacer que el intermetálico se deforme, ya que el módulo está relacionado con las energías de enlace de los átomos. Coincidiendo con lo reportado anteriormente, donde se indican que el incremento en el porcentaje de Al (de 25 a 50 %) en estos intermetálicos provoca la disminución de la ductilidad (8% a 2.5%) [5]. Este comportamiento es atribuido a la generación de vacancias conforme la estequiometría del intermetálico se desvía hacia el lado rico de aluminio (incremento del %Al) y a defectos sustitucionales hacia el lado rico de hierro (incremento del %Fe) [6,7]. La concentración de vacancias es 40 veces más que las encontradas en un metal normal a temperaturas de fusión, estas vacancias juegan un rol importante en las propiedades mecánicas debido a que son las causas del endurecimiento a bajas temperaturas y controlan la difusión a elevadas temperaturas. Otro factor que influye en las propiedades mecánicas es el tamaño de grano, el intermetálico Fe₃Al tiene un tamaño de grano mayor a las 500 μ m, mientras en el FeAl su tamaño de grano es en promedio de 300 μ m [5].

Tabla 1 Propiedades mecánicas obtenidas por nanoindentación.

Muestra	H	S	Y
FeAl	9.79 \pm 0.4	178804 \pm 5160	246.91 \pm 5.8
Fe ₃ Al	7.1 \pm 0.1	166772 \pm 2720	197.76 \pm 3.3

Conclusiones

Las propiedades mecánicas de módulo de Young, rigidez y dureza de las aleaciones intermetálicas, fueron obtenidas por medio de la técnica de Nanoindentación, en el caso de los aluminuros de hierro FeAl y Fe₃Al se presenta un incremento de las mismas conforme aumenta el contenido de Al por el aumento en la generación de vacancias hacia el lado rico de Al, haciendo por lo tanto al FeAl menos dúctil.

Referencias

1. Zhengwei Li, Wei Gao. *Intermetallics Research Progress*, Ed. Nova Science Publishers, (2008), p. 1-64.
2. Deevi S.C. Sikka V.K. *Intermetallics*, (1996), 4, p. 357-375.
3. D.A. Lucca, K. Herrmann, M.J. Klopstein. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, (2010), 59, p. 803-819.
4. W.C. Oliver, G.M. Pharr. *J. Mater. Res.* (1992), 7, p. 1564-1583.
5. K. Vedula. FeAl and Fe₃Al. *Structural Applications of Intermetallic Compounds*. Chapter 9. Edited by J. H. Westbrook and R. L. Fleischer ©1995, 2000 John Wiley & Sons Ltd.
6. M. Nakamura. Elastic Properties. *Basic Mechanical Properties and Lattice Defects of Intermetallic Compounds*. Chapter 1. Edited by J. H. Westbrook and R L Fleischer ©1995, 2000 John Wiley & Sons Ltd.
7. E. Frutos, D.G. Morris, M.A. Muñoz-Morris. *Intermetallics*, (2013), 38, p. 1-3.