



**INSTITUTO TECNOLÓGICO
de saltillo**



ARTÍCULO 23

**FACTIBILIDAD DEL USO DE NANOPARTÍCULAS DE W EN
LA REPARACIÓN DE ÁLABES DE TURBINA INCONEL 725
POR EL PROCESO BRAZING**

*Leticia. L. Rdz-López¹, H. M. Hdz-García¹, M.J. Castro-Román², V. H. López-Cortez¹,
R. Muñoz-Arroyo¹, Wayne N. P. Hung³, J. C. Díaz-Guillen¹*

¹CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES S.A. DE C.V.

²CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN

³TEXAS A&M UNIVERSITY, DEPARTMENT OF MECHANICAL AND ADVANCED MANUFACTURE

FACTIBILIDAD DEL USO DE NANOPARTÍCULAS DE W EN LA REPARACIÓN DE ÁLABES DE TURBINA INCONEL 725 POR EL PROCESO BRAZING

Feasibility of using W nanoparticles to repair 725 Inconel turbine blades by Brazing process

Leticia. L. Rdz-López¹, H. M. Hdz-García¹, M.J. Castro-Román², V. H. López-Cortez¹, R. Muñoz-Arroyo¹, Wayne N. P. Hung³, J. C. Díaz-Guillen¹

leticia.rdz@comimsa.com

¹Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V., Ciencia y Tecnología No. 790 Fracc. Saltillo 400; Saltillo, Coah. CP. 25290.

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Carr. Mty-Saltillo km. 13; Ramos Arizpe, Coah. CP. 25900.

³Texas A&M University, Department of Mechanical and Advanced Manufacture, MS 3367, College Station, TX 77843

Resumen

La impregnación de nanopartículas de W de 90 nm sobre superficies de fractura, previo al proceso de reparación de álabes Inconel-725 por Brazing, permite unir microgrietas y modificar la morfología y tamaño de los eutécticos en el cordón de soldadura. Este efecto se observó por técnicas de microscopía óptica en álabes de Inconel 725 reparados por Brazing en un horno de resistencias al vacío a 1150 °C por 2 h bajo un flujo de 0.1 L/min de Ar y, envejecidas a 800 °C por 2, 6, 10 y 14 h. La disminución en el tamaño de los eutécticos en la zona reparada (cordón de soldadura) fue de 70 a 12 μm por 14 h. La impregnación de nanopartículas de W sobre fracturas de álabes y, el posterior tratamiento térmico de envejecimiento permite la obtención de microestructuras aceptables técnicamente.

Abstract

Impregnating of W nanoparticles of 90 nm on fracture surfaces, prior to the repair of blades Inconel-725 by brazing, allow to join microcracks and modify the morphology and size of the eutectic in the weld bead. This effect was observed by optical microscopy techniques on samples of 725 Inconel blades repaired by brazing at 1150°C for 2 h in a vacuum furnace using flows of 0.1 L/min of Ar and aged at 800°C for 2, 6, 10 and 14 h. The diminishing of eutectic sizes in the repaired zone (weld bead) was from 70 to 12 μm for 14 h. Besides, a noteworthy feature of this reduction of size it is the change of morphology. These effects of W nanoparticles on the microstructures with aging heat treatments are technically acceptable.

Palabras clave: nanopartícula, Inconel 725, brazing, eutéctico, tungsteno

1. Introducción

Los álabes para turbinas de Inconel 725 para extraer hidrocarburos tienen buena resistencia mecánica y a la corrosión a temperatura ambiente. Sin embargo, el servicio útil de estos componentes disminuyen debido a que están expuestos a condiciones severas de trabajo: fatiga y corrosión a temperaturas mayores a 250 °C. Estos problemas se agudizan en el momento de reemplazar el componente por fractura. Debido a su alto costo de fabricación. Razón por la que, se ha intentado reparar estos componentes por tres procesos: soldadura por fusión, unión por difusión y soldadura fuerte (Brazing) [2-3]. Comparativamente, la ventaja de la soldadura fuerte, es una técnica alternativa para la unión de componentes fabricados a partir de aleaciones especiales [4-6]. Sin embargo, en la zona de reparación a menudo contienen fases grandes de eutécticos e intermetálicos duros y frágiles que disminuyen las propiedades mecánicas y de corrosión [7-9]. Una alternativa para evitar la formación de fases eutécticas e intermetálicos es el uso de la formación de una fase líquida transitoria (TLP) (también llamado soldadura fuerte difusión) [3, 7, 10-12], que consiste en una solidificación isotérmica completa de la TLP que existe temporalmente durante el proceso de soldadura fuerte. En la unión TLP, el metal de relleno de soldadura fuerte debe contener elementos depresores del punto de fusión (DPF), tales como boro, silicio y fósforo [3, 10, 13-14]. Los DPF son elementos que presentan cierta solubilidad o formación de películas líquidas de alta solubilidad en el metal base. Esto con el fin de reducir el crecimiento de las fases eutécticas e intermetálicos. Actualmente, para el desarrollo del proceso de unión TLP algunas alternativas se han utilizado, tales como el uso de nanopartículas como agentes eficaces para retardar o evitar el crecimiento de compuestos eutécticos e intermetálicos [15-18]. El crecimiento del tamaño de los eutécticos son dependientes del gap de reparación [18].

El objetivo de este trabajo parte de experimentos previos en la reparación de aceros inoxidables 304 por Brazing empleando nanopartículas de Si y W. El efecto que se ha estado evaluando es sobre las fases eutécticas en la zona reparada. En base a estos resultados previos, se pretende escalarlo para reparar álabes para turbinas Inconel 725. Por lo tanto, en este trabajo se muestran resultados del efecto de las nanopartículas de W en el crecimiento de eutécticos en muestras reparadas por Brazing y, tratadas térmicamente por envejecimiento a diferentes tiempos.

2. Desarrollo experimental

Etapa 1: Caracterización e impregnación de nanopartículas de W ($W_{(NPs)}$) sobre fracturas con tratamiento térmico sin usar pasta de soldadura.

Las nanopartículas de W son grado reactivo marca Springyng-Sasano de morfología esférica con tamaños aproximados de 200 nm.

Con el fin de estudiar el efecto de las nanopartículas de W en la reparación de álabes de Inconel-725 por soldadura Brazing en combinación con tratamientos térmicos de envejecimiento. Es importante mencionar que se repararon álabes sin y con nanopartículas de W.

Se caracterizó la composición química de los álabes fracturados por vía húmeda. En el caso de los álabes reparados con $W_{(NPs)}$, las fracturas se impregnaron con 0.5 g de $W_{(NPs)}$ que fueron previamente dispersadas cinco veces en 20 ml de etanol por 1 h para obtener tamaños homogéneos menores a 90 nm (evitar aglomerados). Asimismo, estas mismas $W_{(NPs)}$ previamente se inspeccionaron por MET FEI Tecnai. Adicionalmente, las fracturas impregnadas con $W_{(NPs)}$ y sin usar pasta de soldadura BNi-9, se trataron térmicamente a 1150 °C por 60 min con rampas de calentamiento y enfriamiento de 10 °C/min. Las superficies con $W_{(NPs)}$ se observaron por microscopía electrónica de barrido (MEB).

Etapa 2: Proceso Brazing y tratamiento térmico de envejecimiento con $W_{(NPs)}$ y pasta de soldadura.

En esta etapa 2 los álabes impregnados con $W_{(NPs)}$ de 90 nm, se repararon por Brazing usando pasta BNi-9 a 1150 °C por 2 h en un tubo de alúmina vertical sellado al vacío y calentado con una resistencia marca Thermocraft. A las muestras dentro del tubo se le hizo pasar un flujo continuo de 0.1 L/min de Ar. Cabe mencionar que las muestras después de 2h de Brazing se extrajeron del horno para enfriarse a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras por separado se envejecieron a 850 °C por 2, 6, 10 y 14 h, empleando rampas de calentamiento de 10 °C/min y usando las mismas condiciones del Brazing en el horno tubular. Igualmente, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras se prepararon por técnicas metalográficas y, se reveló microestructura mediante ataque electroquímico por 3 s utilizando una mezcla de 10 ml de H_3PO_4 , 50 ml H_2SO_4 y 40 ml HNO_3 como electrolito y, empleando una fuente de poder de 3V y 0.4 A. Finalmente, se inspeccionaron los cordones de soldadura de los álabes reparados por microscopía óptica y MEB.

3. Resultados y discusiones

3.1 Composición química del álabe de turbina

Se analizó químicamente la muestra por espectrometría de emisión óptica. Con el objetivo de conocer el porcentaje de elementos químicos presentes en el álabe. Así, de esta forma aplicar adecuadamente los tratamientos térmicos de Brazing y envejecimiento. Comparativamente, la tabla 1 resume la composición química de una muestra del álabe a soldar por Brazing y la reportada en la literatura para la aleación Inconel 725 [1].

Tabla 1: Composición química en %e.p. de la muestra del álabe base níquel

Muestra	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	C	Mn	Si	P	S	Fe
Analizada	55.2	19	8.2	1.75	1.12	0.18	0.027	0.20	0.15	0.012	0.009	Balance
Inconel 725	55-59	19-22	7-9.5	2.75-4	1-1.7	0.35	0.03	0.35	0.20	0.015	0.010	Balance

3.2 Inspección estereoscópica de la zona de fractura del álabe

Antes de llevar a cabo la impregnación y reparación de las muestras mediante el proceso Brazing con y sin nanopartículas, se inspeccionó la zona de fractura. En la figura 1 se aprecian grietas que se extienden y propagan a través del área del material. Lo anterior sugiere impregnar la superficie de fractura con las nanopartículas de W. Con el fin de que se internen entre los microporos y microgrietas que no son visibles a simple vista. Así, durante el Brazing estas sellen la microgrietas e incrementen la reactividad química del W entre el metal base y la pasta.



Figura 1. Imágenes por estereoscopio de la superficie de fractura del álabe conteniendo grietas observadas a ampliaciones de 25 X.

3.3 Caracterización de las nanopartículas de W empleadas en la soldadura Brazing.

La figura 2 (a) y (b) muestra las nanopartículas de tungsteno y el análisis por energía dispersiva de rayos-X. Estas nanopartículas no fueron dispersas en el etanol. Por lo tanto, se aprecia tamaños mayores a 200 nm adyacentes a aglomerados (fig. 2 (a)). La naturaleza química de las nanopartículas corresponden principalmente al elemento de tungsteno (W) con trazas de Cu, O y C, que corresponden a la composición química de la rejilla (fig. 2 (b)).

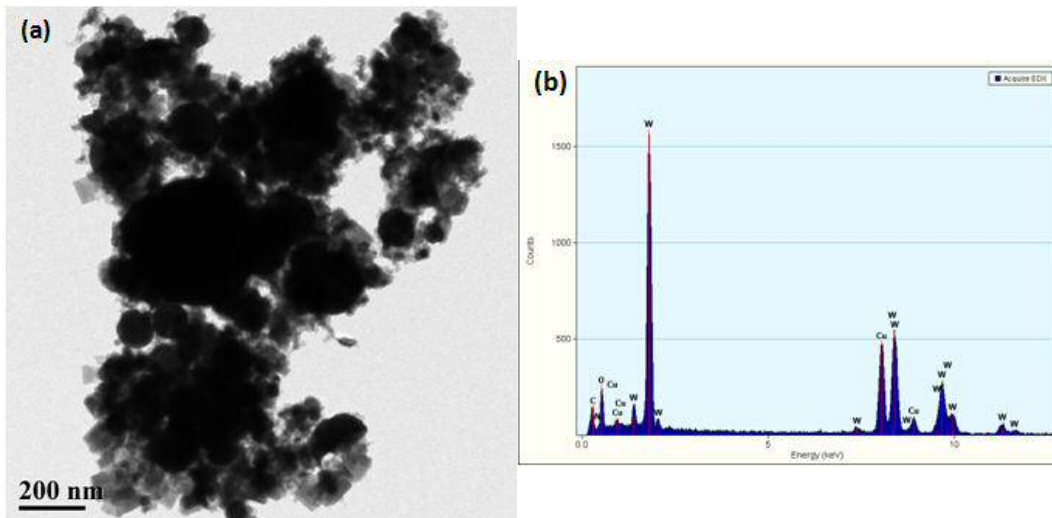


Figura 2. a) Imagen de transmisión electrónica de las nanopartículas de tungsteno sin dispersar y b) Análisis químico por energía dispersiva de rayos-X.

En la figura 3 se muestran nanopartículas de W obtenidas a partir de cinco dispersiones en etanol. Se aprecian tamaños y aglomerados menores a 90 nm. Estas características más homogéneas hace posible la impregnación de las nanopartículas de W en la superficie de fractura.

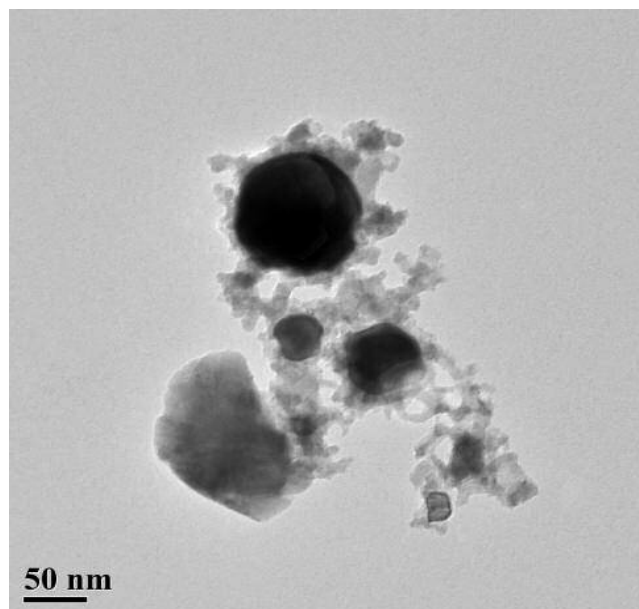


Figura 3. Imagen de transmisión electrónica de las nanopartículas de W dispersadas

Previo al proceso de reparación de álabes por Brazing, las superficies de fractura impregnadas de $W_{(NPs)}$ sobre las superficies de fractura sin usar pasta se introdujeron al

horno a 1150 °C por 60 min. Se aprecia que las nanopartículas tienen alta reactividad superficial. Favoreciendo el crecimiento de las mismas y la formación de cuellos de sinterización. Esto sugiere la presencia de la formación de películas líquidas sobre la superficie del W (figura 4).

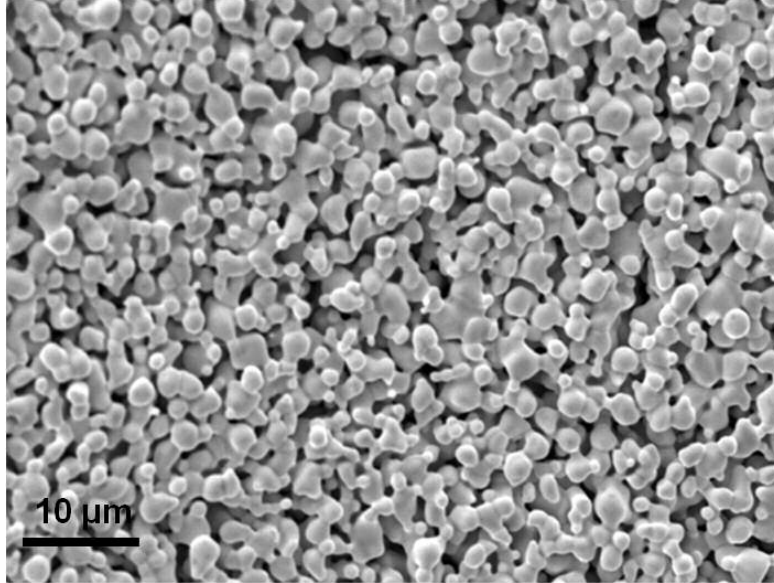


Figura 4. Imagen de electrones secundarios de partículas de W crecidas a partir de $W_{(NPs)}$ de 90 nm a 1150 °C por 60 min. Previas al proceso Brazing.

3.4 Inspección de las microestructuras de las muestras de los álabes reparados

En este punto se analizan y discuten las muestras en condición de pulido de los álabes reparados. Con el fin de observar notoriamente la línea de precipitación o reacción de las nanopartículas de W. Así mismo, estas muestras se atacaron químicamente para revelar microestructura y, observar el efecto de las $W_{(NPs)}$ sobre el crecimiento de fases.

La figura 5 (a), (b), (c) y (d) muestra fotomicrografías en condición de pulido con tratamiento térmico de envejecimiento usando $W_{(NPs)}$ a 800 °C por 2, 6, 10 y 14 h. En la figura 5 (a) se aprecian a 6 h de envejecimiento un refinamiento de microestructura (figura 5 (b)). Conforme incrementa el tiempo de 10 a 14 h la zona de fusión se homogeniza (figura 5 (c) y (d)). Debido a la al tiempo del tratamiento de envejecimiento y difusión en estado sólido de las especies químicas en la pasta y el metal base.

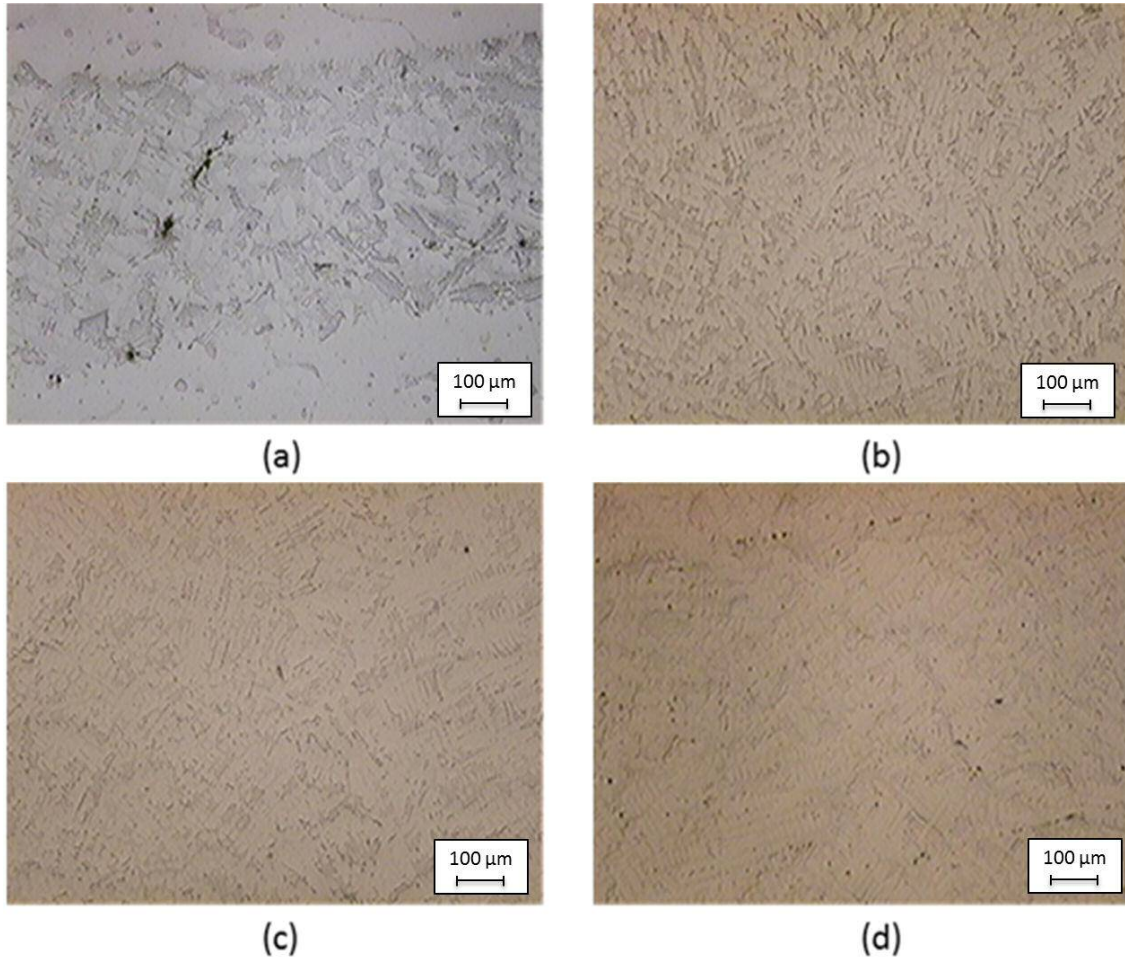


Figura 5. Fotomicrografía de la zona de fusión en condición de pulido de una muestra de álabe soldada por Brazing usando nanopartículas de W.

En inspecciones de muestras reveladas electroquímicamente se aprecia el efecto del $W_{(NPs)}$ en la morfología y tamaño de las fases eutécticas. En la figura 6 (a), (b), (c) y (d) se muestran microestructuras de las zonas de los álabes reparados por el proceso Brazing a 1150 °C y, envejecidas a 800 °C por 2, 6, 10 y 14 h. Comparativamente, se aprecia la disminución del tamaño de las fases eutécticas y el cambio de morfología. Esto indica un efecto significativo de las $W_{(NPs)}$ en la morfología y el tamaño de los eutécticos.

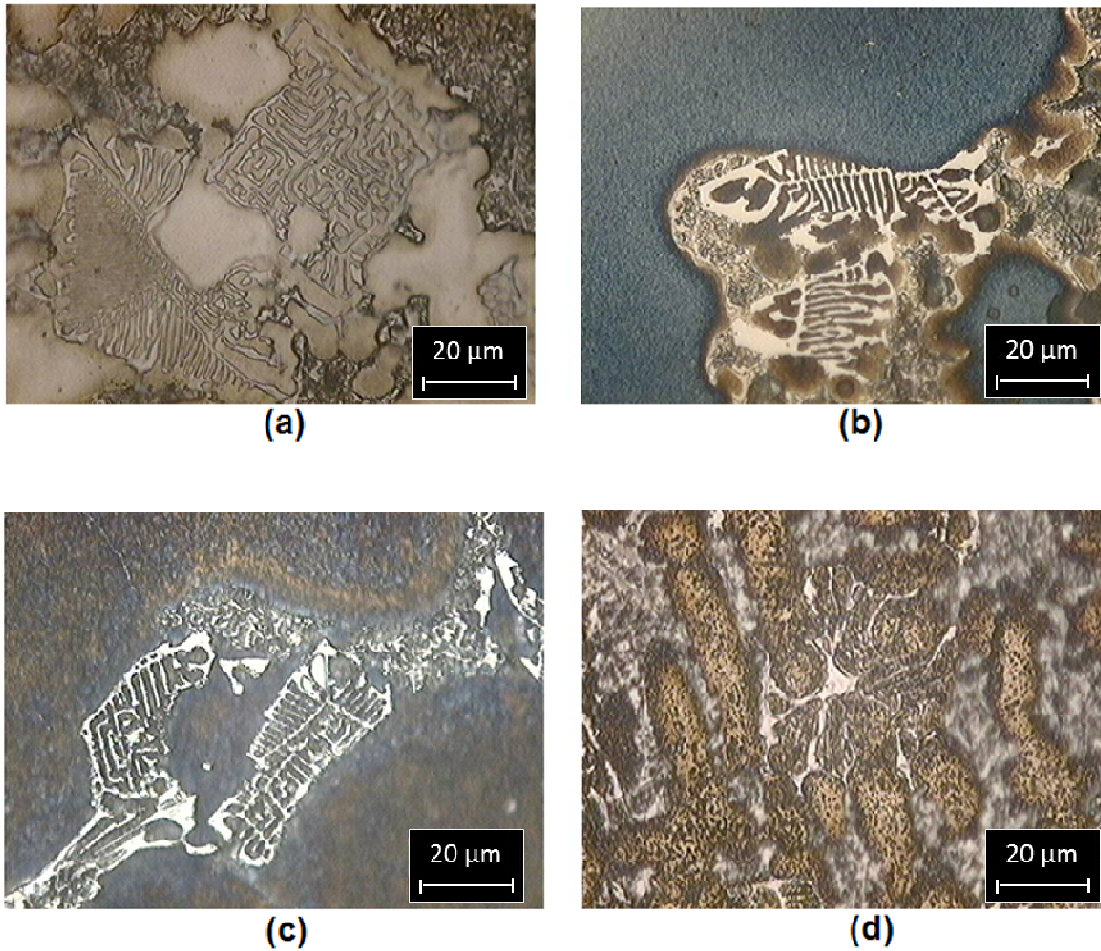


Figura 6. Micrografías de álabes reparados por Brazing y con nanopartículas de W a 1150 °C por 2 h y envejecidas a 800 °C: a) 2 h y b) 6 h, c) 10 h y d) 14 h.

A altas ampliaciones se aprecia en mayor detalle el efecto del $W_{(NPs)}$ en los eutécticos en las muestras tratadas térmicamente a 800 °C por 2 y 14 h de envejecimiento (figura 7 (a) y (b)).

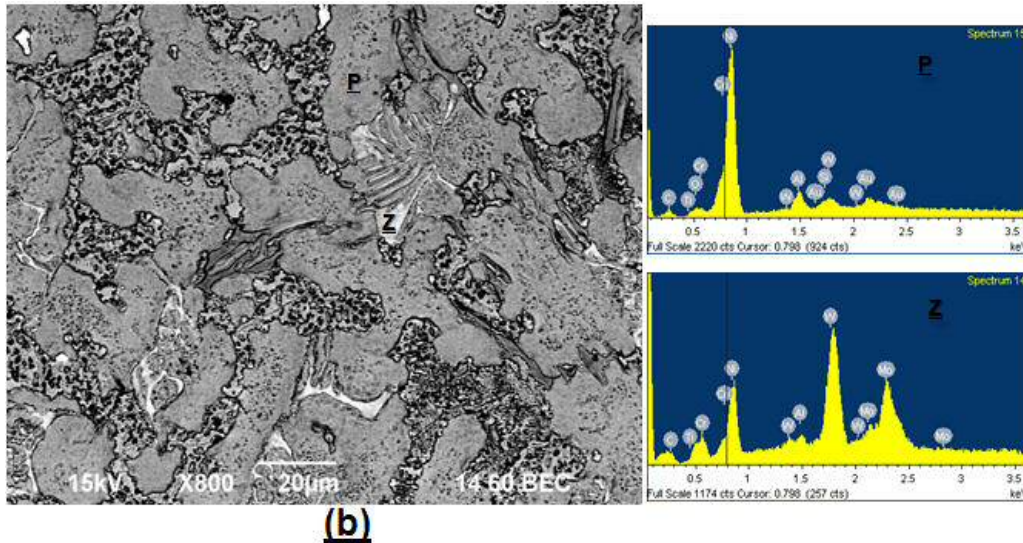
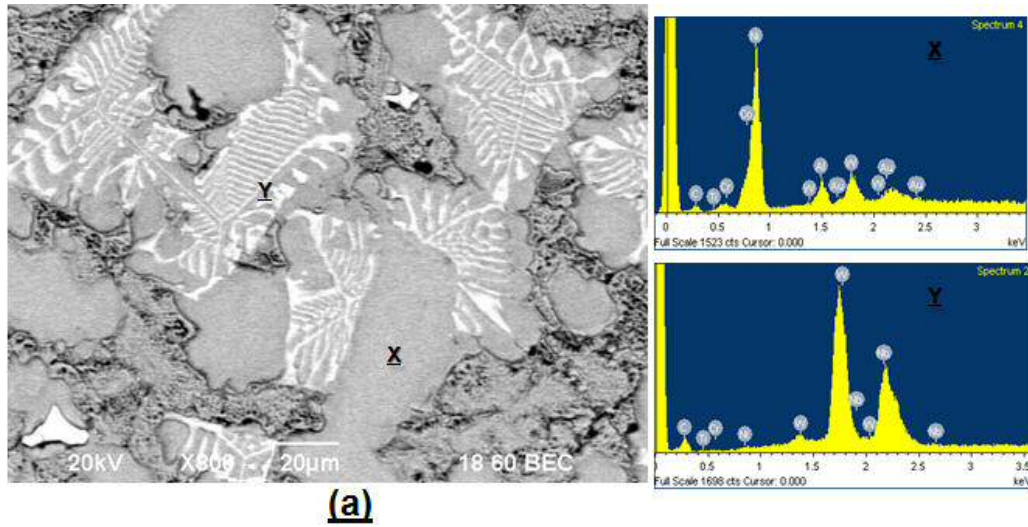


Figura 7. Imágenes de electrones retrodispersados de eutécticos modificados a 800 °C: **a)** 2 h y **b)** 14 h.

Hasta el momento la disminución de las fases es aceptable. Debido a que entre más grandes los eutécticos mayor fragilidad inducen en el álabe reparada y, desgastan las herramientas de corte durante el rectificado del cordón de soldadura. Las fases eutécticas tipo Fe-Ni-Cr se forman por procesos difusivos entre las especies químicas de la pasta y la aleación.

4. Conclusiones

La alta reactividad de las nanopartículas de W a 1150 °C por 60 min se evidencia por el crecimiento del W y la formación previa de películas líquidas para formar cuellos de sinterización. De acuerdo a los resultados observados las nanopartículas de W interactúan

con los procesos difusivos entre la pasta y el metal base para refinar el tamaño de grano del cordón de soldadura en función de tiempo. Esto conlleva a tener buenas propiedades mecánicas en la zona reparada. Adicionalmente, se disminuye el tamaño del eutéctico y afecta la morfología de los mismos.

5. Bibliografía

- [1] INCONEL, INCOLOY, INCO-WELD, and 725NDUR. www.specialmetals.com
- [2] P.-J. Cunat, *The Welding of Stainless Steels*, Euro Inox, Luxembourg, (2007).
- [3] V. Jalilvand, H. Omidvar, H. R. Shakeri, M. R. Rahimipour, *Mater. Charact.* 75 (2013) 20-28.
- [4] M. Abdelfatah, O. A. Ojo, *Mater. Sci. Technol.* 25 (2009) 61-67.
- [5] R. M. D. Nascimento, A. E. Martinelli, A. J. D. A. Buschinelli, U. Reisgen, J. Remmel, J. *Mater. Sci.* 40 (2005) 4549-4556.
- [6] A. Ghoneim, O. A. Ojo, *Mater. Charact.* 62 (2011) 1-7.
- [7] G. O. Cook, I. I. I. Carl, *J. Mater. Sci.* 46 (2011) 5305-5323.
- [8] J. T. Stover, *Review of the State of the Art of High-Temperature Brazing for Combustion Turbine Components*, ERPI, Palo Alto, CA, (2003), p. 1005029.
- [9] M. A. Arafin, M. Medraj, D. P. Turner, P. Bocher, *Mater. Sci. Eng. A* 447 (2007) 125-133.
- [10] M. Mosallaei, A. Ekrami, K. Ohsasa, K. Matsuura, *Metall. Mater. Trans. A* 39 (2008) 2389-2402.
- [11] O. A. Idowu, O. A. Ojo, M. C. Chaturvedi, *Metall. Mater. Trans. A* 37A (2005) 2787-2796.
- [12] M. Pouranvari, A. Ekrami, A. H. Kokabi, *J. Alloy. Compd.* 469 (2009) 270-275.
- [13] N. P. Wikstrom, A. T. Egbewande, O. A. Ojo, *J. Alloy. Compd.* 460 (2008) 379-385.
- [14] N. R. Philips, C. G. Levi, A. G. Evans, *Metall. Mater. Trans. A* 39 (2007) 142-149.
- [15] S. Y. Chang, C. C. Jain, T. H. Chuang, L. P. Feng, L. C. Tsao, *Mater. Design* 32 (2011) 4720-4727.
- [16] R. Eluri, B. K. Paul, *Materials & Design* 36 (2012) 13-23.
- [17] R. Eluri, B. Paul, *J. Manuf. Process.* 14 (2012) 471-477.
- [18] Santiago-Bautista, H. M. Hdz-García, R. Muñoz-Arroyo, M. Garza-Castañón, F. García-Vázquez, J. Acevedo-Dávila, *Mater. Resear. Proceed.*, Vol. 1481, (2012), p.119-127.