

# Sistemas multicomponentes NiCoAlFeCrTi sintetizados por aleado mecánico

Cynthia Deisy Gómez-Esparza<sup>1</sup>, I. Estrada-Guel<sup>1</sup>, Ornelas-Gutiérrez C.E.<sup>1</sup>, Solís-Canto O.<sup>1</sup>, Cabañas-Moreno J. G.<sup>2</sup>, Herrera-Ramírez J. M.<sup>1</sup>, \*Martínez-Sánchez R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Laboratorio Nacional de Nanotecnología, Miguel de Cervantes 120, 31109 Chihuahua, Chih., México. <sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional – CNMN, UPALM, 07338 México, D.F., México.

\*[roberto.martinez@cimav.edu.mx](mailto:roberto.martinez@cimav.edu.mx)

Las aleaciones tradicionales están compuestas de uno o dos elementos principales con adiciones menores de otros elementos para modificar sus propiedades. Novedosos sistemas de aleaciones compuestas de al menos 5 elementos principales en concentraciones equiatómicas o entre 5 y 35 % atómico, denominadas aleaciones de alta entropía, o sistemas multicomponentes, fueron propuestos por Yeh et al., en 2004. Ellos encontraron que estas aleaciones poseen alta entropía de mezcla, por lo que se favorece la formación de soluciones sólidas con estructura simple FCC y/o BCC [1-3]. La alta entropía de mezcla puede significativamente reducir la energía libre, y esto reduce la tendencia a ordenar y hace aleaciones más estables con múltiples elementos principales, opuesto a la deducción de formación de estructuras complejas formadas por compuestos intermetálicos.

Desde el desarrollo de las aleaciones de alta entropía, el sistema AlCoCuCrFeNi ha sido el más ampliamente estudiado en términos de microestructura y propiedades mecánicas. Sin embargo, a partir de los múltiples reportes de que el Cu tiende a segregarse en las fronteras de grano, la aleación AlCoCrFeNiTi empezó a cobrar mayor interés de estudio [4].

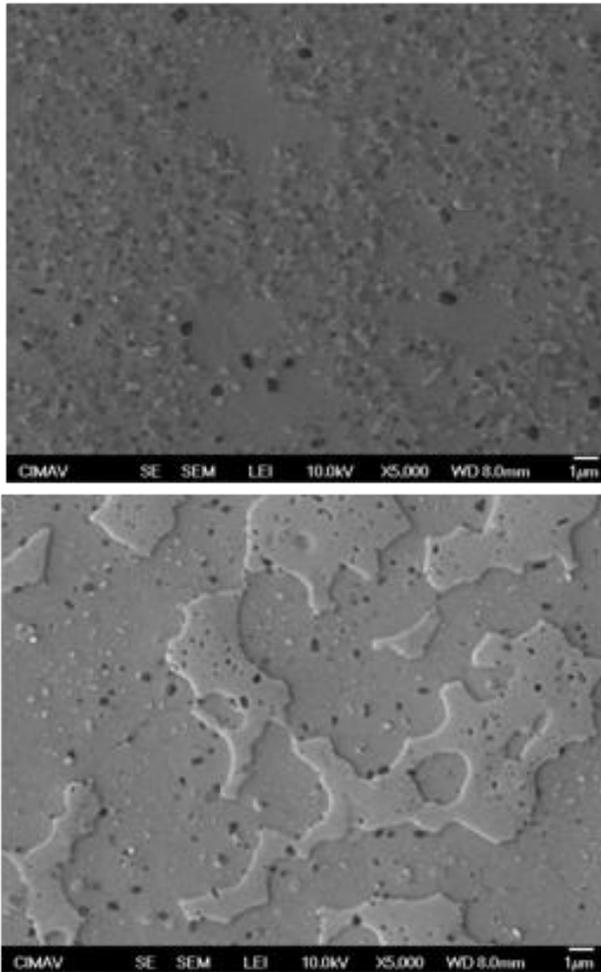
Los elementos de aleación con diferentes estructuras cristalinas afectarán las microestructuras y las propiedades de las aleaciones. Sin embargo, aún no está clara la relación entre la estructura de los elementos aleantes y la de las aleaciones de alta entropía, así como las microestructuras formadas. Por ello se tiene como objetivo el estudio de la aleación NiCoAlFeCrTi, para su caracterización microestructural, así como también la de la aleación NiCoAlFeTi, de la cual existe menos investigación al respecto.

Mediante la técnica de aleado mecánico (AM), se produjeron dos aleaciones de alta entropía, NiCoAlFeTi y NiCoAlFeCrTi. Se emplearon polvos elementales de alta pureza para su síntesis. El proceso de AM fue desarrollado bajo atmósfera de argón, en un molino de alta energía (SPEX-8000M), durante 10h. Se utilizó metanol como agente controlador del proceso. Los polvos aleados fueron consolidados mediante compactación en frío con una presión de 1.5GPa, y posteriormente sinterizados a 1473K durante 3h, en vacío. La caracterización microestructural fue realizada empleando un microscopio electrónico de barrido (MEB) con emisión de campo JEOL JSM-7401F y un microscopio electrónico de transmisión (MET) de emisión de campo JEOL JEM2200F con corrector de aberración esférica para STEM y filtro omega. Además se empleó difracción de rayos X con el fin de comprender la evolución microestructural de las aleaciones después del proceso de aleado mecánico y sinterización.

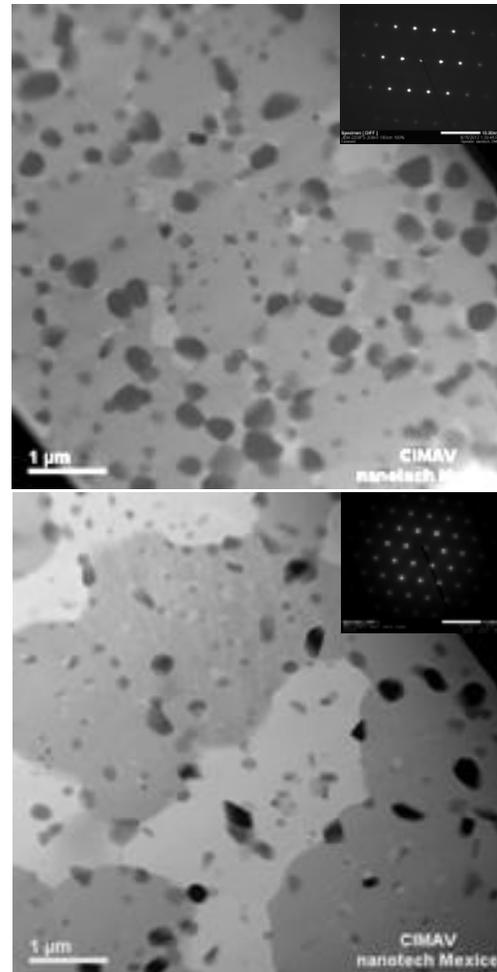
En la tabla 1 se reportan los resultados de los análisis químicos elementales mediante EDS con microscopía electrónica de barrido (MEB) de las fases principales de los productos sinterizados. En la figura 1 se presentan imágenes de MEB con electrones secundarios, donde se puede observar la microestructura representativa de las aleaciones después del proceso de sinterización.

La microestructura de la aleación NiCoAlFeTi consta de una matriz, que se puede observar como una fase oscura, la cual es rica en Ni, Co y Fe, con la presencia de tres tipos de precipitados redondeados, cuyo tamaño promedio no excede de  $0.5\mu\text{m}$ . Al adicionar Cr, se conserva una matriz de fase oscura rica en Ni, Co y Al, y se forma una segunda fase clara, esta es rica en Fe y Cr. En esta aleación también se presenta la formación de tres tipos de precipitados, distribuidos en las dos fases presentes.

Se realizaron mediciones de microdureza en las muestras sinterizadas. La muestra con Cr presenta valores mayores de dureza. Los resultados se presentan en la tabla 2. El Cr está favoreciendo el endurecimiento por solución sólida.



**Figura 1.** Imágenes de MEB de las aleaciones: (a) NiCoAlFeTi y (b) NiCoAlFeCrTi después del proceso de sinterización a 1473K, durante 3h.



**Figura 2.** Imágenes de microscopía electrónica de transmisión en modo STEM de las aleaciones: (a) NiCoAlFeTi y (b) NiCoAlFeCrTi después del proceso de sinterización a 1473 K, durante 3 h. Se muestran los patrones de difracción de las fases oscuras respectivas de las aleaciones.

Aleación	Ni	Co	Al	Fe	Ti	Cr
<b>NiCoAlFeTi</b>						
Matriz	37.39	31.80	5.84	24.97	–	–
<b>NiCoAlFeCrTi</b>						
Fase oscura	32.24	24.06	17.31	10.23	3.99	12.16
Fase clara	–	7.60	2.33	38.43	–	49.86

**Tabla 1.** Resultados análisis EDS de la composición química de las aleaciones sinterizadas (% atómico)

Sistema	Microdureza
NiCoAlFeTi.	533 – 616 HV
NiCoAlFeCrTi	730 – 783 HV

**Tabla 2.** Resultados de microdureza Vickers de las aleaciones sinterizadas.

**Referencias:**

- [1] B.S. Li et al. / *Materials Science and Engineering A* 498 (2008) 482–486
- [2] M. Chen, Y Liu, Y.X. Li, X. Chen, *Acta Metall. Sinica* 43 (2007) 1020–1024
- [3] K.B. Zhang et al. / *Materials Science and Engineering A* 508 (2009) 214–219
- [4] T.-T. Shun, Y.-C. Du / *Journal of Alloys and Compounds* 478 (2009) 269–272