

OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DEPOSICIÓN POR TERMORROCIADO POR PLASMA ATMOSFÉRICO DE RECUBRIMIENTOS DE NiCrAlCoYO USADOS COMO CAPA DE ANCLAJE EN SISTEMAS BARRERAS TÉRMICAS

S. Liscano*, P. Padilla, M. Romero, L. Gil

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Departamento de Ingeniería
Metalúrgica, Urb. Villa Asia, Puerto Ordaz, Venezuela

*e-mail: sliscano@unexpo.edu.ve Tlf-fax: +58-286-9624595

Recibido: Noviembre 2015. Aprobado: Abril 2016.

Publicado: Mayo 2016.

RESUMEN

Los recubrimientos del tipo MCrAlY son utilizados como capa de enlace entre la capa cerámica y el sustrato de los sistemas tipo Barreras Térmicas. Entre los métodos de fabricación se encuentra la tecnología de termorrociado por plasma atmosférico, cuyos recubrimientos están caracterizados por ser granulares, rugosos y de alta porosidad. La resistencia mecánica y función protectora de las Barreras Térmicas depende en gran medida de los parámetros de proyección, por lo que estos deben ser controlados de forma precisa. En este trabajo se evalúa la influencia de las variables, corriente eléctrica y voltaje de la pistola de plasma, con el fin de obtener las mejores respuestas en términos de microdureza y porosidad de los recubrimientos metálicos NiCoCrAlYO obtenidos por termorrociado por plasma atmosférico. Se realizó la evaluación microestructural con Microscopía Óptica con análisis de imagen y Microscopía Electrónica de Barrido con Microanálisis por energía dispersiva de rayos X (EDX), así como mediciones de microdureza vickers en secciones transversales de los recubrimientos preparadas metalográficamente. Los resultados indican que es posible obtener recubrimientos densos y con valores de microdureza superiores a la especificación mediante una combinación de 800 A de corriente y 40 V de voltaje de la pistola de plasma.

Palabras Claves: NiCoCrAlYO, Microdureza, Porosidad, Termorrociado por Plasma Atmosférico (APS).

OPTIMIZATION OF THE PLASMA SPRAY PARAMETERS OF NiCrAlCoYO COATINGS USED LIKE BOND COAT IN THERMAL BARRIERS SYSTEMS

ABSTRACT

MCrAlY type coatings are used as coat bond between the ceramic layer and substrate type systems thermal barriers coatings. Among methods of manufacturing technology is thermal sprayed by atmospheric plasma, whose coatings are characterized as granular, rough, high porosity. The mechanical strength and thermal barriers protective function depends largely on the projection parameters, so they must be accurately controlled. This paper evaluates the influence of variables, electric current and voltage of the plasma torch in order to obtain the best answer on the microhardness and porosity of the coatings obtained by thermal spraying metal NiCoCrAlYO air plasma. Microstructural evaluation was performed by light microscopy with image analysis and scanning electron microscopy, likewise Vickers hardness measurements. The result shows that are possible to obtain dense coatings with higher hardness value than the specification, using a combination of 800 A of current and 40 V of torch plasma voltage.

Keywords: NiCoCrAlYO, Microhardness, porosity, air plasma thermal spraying (APS).

INTRODUCCIÓN

La eficiencia en los sistemas de producción de energía de ciclo combinado recae en el rendimiento de los materiales que conforman los motores de turbina de gas. Las

aleaciones de base-níquel y superaleaciones son empleadas para la fabricación de los álabes que están expuestos a altas temperaturas en la línea de combustión.

Los recubrimientos termorrociados tipo barreras térmicas se utilizan para aumentar la durabilidad y temperaturas de operación de estos componentes de la turbina [1]. Las barreras térmicas, consisten en sistemas multicapa formados por un recubrimiento cerámico que actúa como aislante térmico, depositado sobre una capa de anclaje, que mejora la adhesión y la resistencia a la corrosión del sustrato metálico [2]. Las capas de anclaje consisten en recubrimientos metálicos del tipo MCrAlY, (el metal M es normalmente Ni, Co, Fe o la combinación entre ellos).

Entre las técnicas de deposición para este tipo de recubrimientos se encuentra la proyección térmica por plasma, la cual consiste en calentar, hasta una condición semifundida, mediante la exposición a un plasma térmico, partículas del material a depositar, para luego ser proyectadas al sustrato o superficie a recubrir mediante un gas de transporte que puede ser gas Ar, N₂, He o mezcla de ellos [3].

Los recubrimientos termorrociados tienden a ser porosos, de un 10 a 20%, su estructura es lamelar y el mecanismo de adherencia es mayoritariamente mecánico. Dentro de las características microestructurales también se encuentran la presencia de microgrietas y partículas no fundidas. Ambas, están asociadas a la falta de fusión del volumen de polvos metálicos que son alimentados al chorro de plasma, y que posteriormente son incorporados al recubrimiento, generando estas discontinuidades que disminuyen su resistencia mecánica [3].

En el sistema barrera térmica es deseable que el material utilizado para la capa de enlace, tenga un esfuerzo de fluencia elevado a altas temperaturas y con un coeficiente de expansión térmica cercanos a los del sustrato, a fin de evitar esfuerzos residuales que facilitarían el desprendimiento del recubrimiento [1].

Los procesos de termorrociado son constantemente evaluados en términos de la optimización de los parámetros del proceso que ofrezcan las mejores

propiedades en término de la función que cumplirán en el sistema protector [4]. Para el caso de las capas de enlace, es necesaria una microestructura homogénea de buena adherencia. La microestructura de los MCrAlY consiste de una estructura de varias fases conteniendo una dispersión fina de aluminuros de cobalto o/y níquel en una matriz de níquel o cobalto, rica en cromo [2].

La durabilidad de la barrera térmica depende íntimamente de los parámetros de proyección de la capa de anclaje y del recubrimiento cerámico, por lo que estos deben ser controlados de forma precisa. La velocidad de alimentación de los polvos, la potencia de la pistola y la distancia de rociado, son ejemplos de los factores a tener en cuenta [4].

Los trabajos más recientes de manipulación de las variables de los recubrimientos termorrociados refieren que las propiedades del recubrimiento, dependen del material de alimentación y su inyección, de los parámetros de formación del chorro de plasma, y de la composición y presión de la atmosfera de gases [4-6].

Tomando en cuenta lo señalado anteriormente y en función de la factibilidad experimental de control de variables de proceso, la presente investigación tiene como objetivo el de evaluar la influencia de los parámetros voltaje y corriente de la pistola, sobre la porosidad y microdureza del recubrimiento

NiCoCrAlYO termorrociado por plasma, a fin de establecer la combinación de parámetros que arroje la mejor respuesta en las propiedades evaluadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un polvo comercial de NiCrAlCoYO para termorrociar de especificación Metco 461NS, Sulzer Metco [7], con un tamaño de partícula promedio de 75 micrones, determinado mediante la técnica de tamizado sónico, empleando un equipo Sonic Sifter y tamices estándares ASTM E-11 con mallas de N° 70 a N° 800. La

morfología del polvo se observó por Microscopía Electrónica de Barrido (Figura 1) en un equipo Marca FEI, Modelo Quanta 200, revelando una forma irregular y de superficie rugosa.

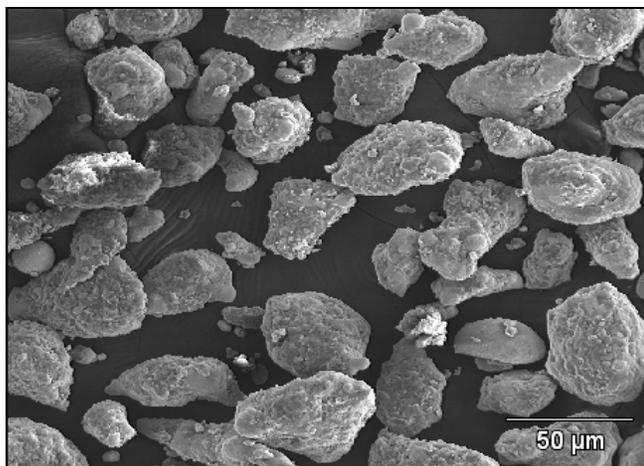


Fig. 1. Morfología del Polvo Cerámico de NiCoCrAlYO mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) Magnificación 200X.

Los recubrimientos se depositaron sobre cupones de aceros ASTM A36, de dimensiones: 19mm x 38,5mm x 3mm empleando una pistola marca Tafa modelo SG-100, con los parámetros mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del proceso de termorrociado.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Distancia de Rociado	130 mm
Flujo de Ar (primario)	100 SCFH
Flujo de H₂(secundario)	20-10 SCFH
Tamaño del Polvo	-150 +45 μ m
Vel. Alim. Polvos	25 gr./seg.

En esta investigación se usó un diseño experimental factorial 2², empleado para establecer los efectos de las variables corriente y voltaje en la calidad del recubrimiento. La corriente se varió entre 700 y 800 A; y el voltaje entre 37 y 40 V. La elección de estas variables y

niveles se basa en la capacidad de control de estos parámetros y su manipulación durante la práctica industrial APS.

En la Tabla 2 se recogen las 4 condiciones resultantes de la combinación de los valores mínimos y máximos de las variables evaluadas.

Tabla 2. Variables del proceso de Termorrociado por Plasma y condiciones.

<i>Condición</i>	<i>Matriz</i>		<i>Plan de Pruebas</i>	
	<i>Corriente</i>	<i>Voltaje</i>	<i>Metco 461NS</i>	
	<i>(A)</i>	<i>(V)</i>	<i>Corriente</i>	<i>Voltaje</i>
			<i>(A)</i>	<i>(V)</i>
1	-	-	700	37
2	+	-	800	37
3	-	+	700	40
4	+	+	800	40

Las muestras recubiertas se seccionaron con una Microcortadora Leco VC-50 empleando un disco de diamante y, posteriormente se realizó el montaje en frío empleando la mezcla de resinas Epo-Thin (Buehler, USA) en una proporción de 5,8 gramos de resina y 3,2 gramos de endurecedor. La sección transversal de las muestras fueron pulidas y desbastadas utilizando un equipo MetaServ 2000 (Buehler, USA) de acuerdo al procedimiento establecido en ASTM E1920 - 03(2014).

La porosidad fue determinada llevando a cabo mediciones de diez campos capturados en la sección transversal de la muestra a un aumento de 200X, empleando un Microscopio óptico, marca Nikon modelo Eclipse TS-100, acoplado a un sistema de análisis de imágenes marca Leco, modelo IA 32. Así mismo, la microestructura y la morfología de los recubrimientos fueron examinados por MEB + EDX empleando el mismo equipo reseñado previamente.

La microdureza de los recubrimientos se determinó sobre la sección transversal pulida de los recubrimientos, a través de diez mediciones, empleando un Microdurómetro Marca Buehler modelo AMH300 y siguiendo la norma ASTM E-384. La carga empleada fue de 300grf, con un tiempo de carga de 15 seg.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Microestructura y Porosidad

La Figura 2 presenta la microestructura de la sección transversal de los recubrimientos en las diferentes condiciones de deposición, obtenidas por microscopía óptica (MO).

Los valores de porosidad (%P) de los recubrimientos son presentados en la Tabla 3. Estos indican que la condición 1 es la que presenta el mayor porcentaje de poros, los cuales se distinguen con facilidad a un aumento de 200X (Ver fig. 1A). La Tabla 2 muestra que esta condición es la que presenta los valores mínimos de corriente y voltaje del plan de pruebas, lo que representa la condición de menor energía (KW) para la pistola de plasma. Por otro lado, a partir de un análisis similar, la condición 4, es la que presenta el menor porcentaje de porosidad, y representa la condición con mayor aporte de energía. Lo anterior permite establecer una relación directa de los parámetros de estudio con la variable de respuesta, en este caso la porosidad, para el rango estudiado: A mayor energía menor porosidad, lo cual es de esperar ya que la formación de una estructura lamelar más densa se ve favorecida por la completa fusión de las partículas en el chorro de plasma. (REF)

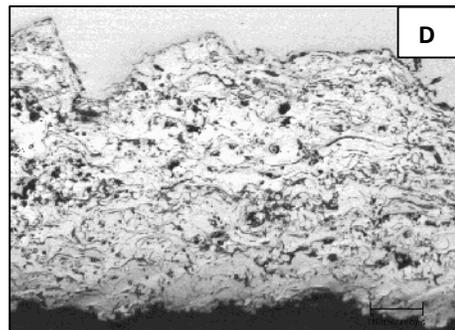
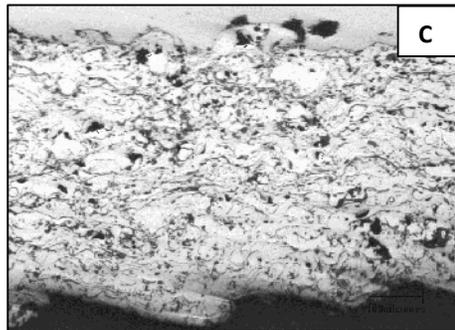
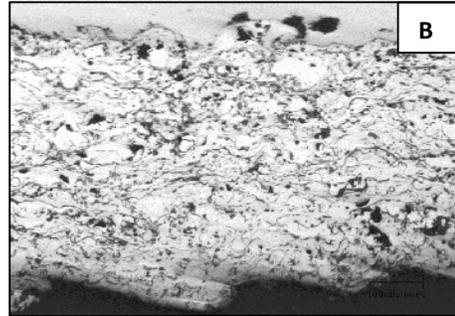
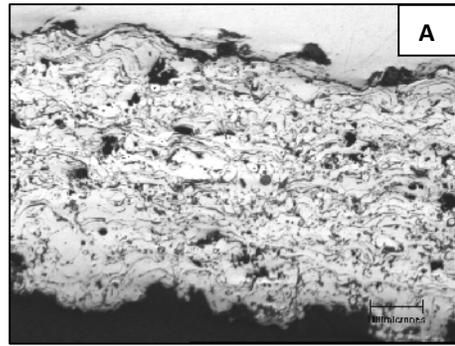


Fig. 2. Micrografías por M.O. de la sección transversal de los recubrimientos (200X). A) Condición 1, B) Condición 2, C) Condición 3, D) Condición 4.

Tabla 3. Porosidad medida de los recubrimientos.

Condición	Porosidad (%P)
1	8,25 ±0,34
2	6,4± 0,56
3	4,05 ± 0,42
4	2,55 ± 0,69

La microestructura observada en las micrografías de la figura 2 corresponde y es la típica de los recubrimientos termorociados, caracterizada por una alta porosidad [3, 8]. Otras características reseñadas para estos recubrimientos pueden ser observadas en la Figura 3: 1) Partículas No fundidas, 2) Grietas interlamelares, y 3) Micro-porosidades

Un número importante de partículas no fundidas pueden ser observadas en la microestructura del recubrimiento depositado en la condición 1 (figura 3).

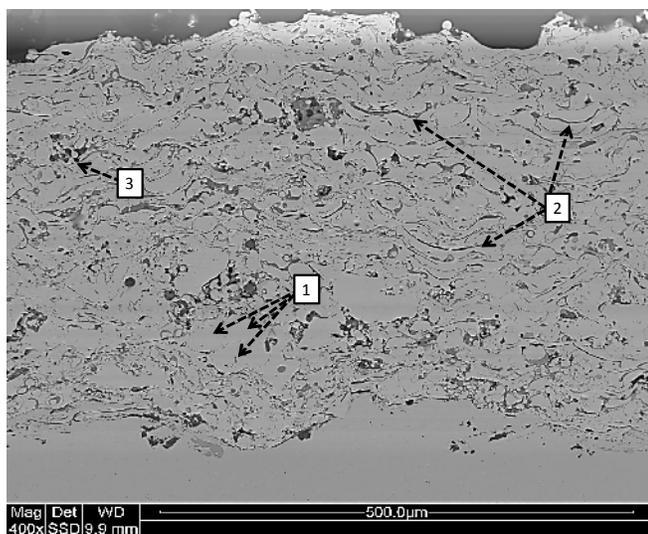


Fig. 3. Micrografía por MEB de la sección transversal del recubrimiento depositado en la condición 1 mostrando partículas no fundidas (1), grietas interlamelares (2) y microporosidades (3).

Con la finalidad de establecer una comparación, la Figura 4 presenta la microestructura por MEB de la sección transversal del recubrimiento depositado en la condición 4, que representa la condición de mayor aporte de energía. Allí se observa una estructura mayoritariamente lamelar, con menor presencia de partículas no fundidas y poros, respecto a la condición 1.

Aun cuando, la presencia de partículas no fundidas y porosidad del recubrimiento puede verse afectada por otras variables como la velocidad de alimentación de los polvos, relación de gases de plasma y distancia de rociado, estas permanecieron constantes en este estudio; por lo que se puede establecer el efecto directo de la corriente y el voltaje sobre la microestructura de los recubrimientos. Para el rango de estudio del presente trabajo, los valores máximos de corriente (800 A) y voltaje (40 V) son los que ofrecen una microestructura más densa y con menos partículas no fundidas, siendo esta la condición deseada para este tipo de recubrimientos que proyectara una mejor adhesión al sistema barrera térmica [8].

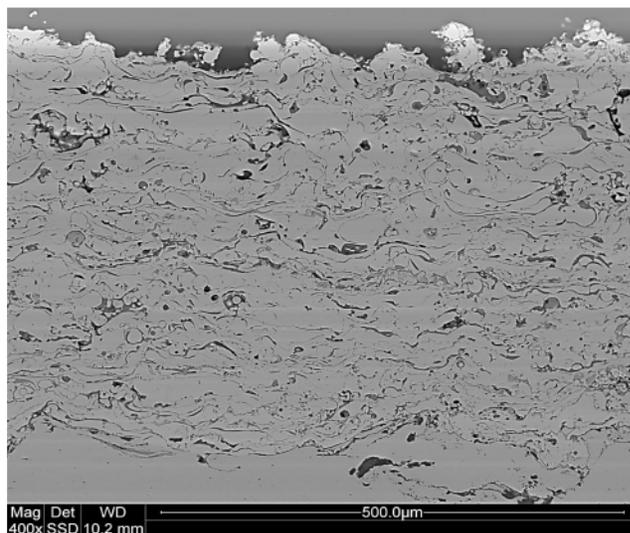


Fig. 4. Micrografía por MEB de la sección transversal del recubrimiento depositado en la condición 4.

La Figura 5 presenta el Mapping de microanálisis composicional por elemento, realizado en una zona de la sección transversal del recubrimiento en la condición 1. Allí se distingue que la matriz del recubrimiento está formada principalmente por Níquel y Cromo, y que el Cobalto, Aluminio e Itrio se encuentran formando fases, las cuales están distribuidas homogéneamente en la microestructura. Estas características morfológicas fueron similares en las demás condiciones [2].

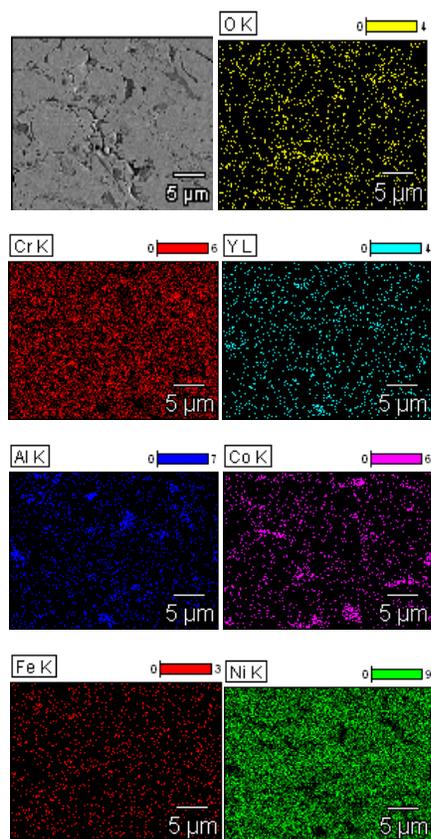


Fig. 5. Mapping de microanálisis elemental de los recubrimientos en la condición 1.

B. Microdureza

En la figura 5, se presenta el gráfico de caja y bigotes para las mediciones de microdureza para cada una de las condiciones bajo estudio. Allí se puede observar que solo para la condición 4 el rango de microdureza ofrece valores

diferentes al de las demás condiciones, y arrojando valores de hasta 250 HV_{0,3} [9].

El comportamiento de la microdureza es cónsono con los resultados de porosidad, y a su vez coincidente con lo reportado en la bibliografía [9]. Una microestructura más densa y con menos partículas no fundidas ofrecerá una respuesta más homogénea y representativa de la microdureza del sistema.

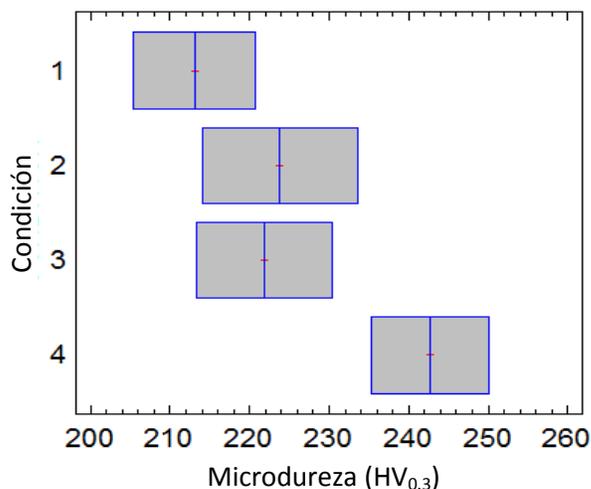


Fig. 6. Microdureza de los recubrimientos.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten establecer que en los rangos evaluados es posible obtener recubrimientos con porosidad de $2,55 \pm 0,69$ % y con valores de microdureza en $243,89 \pm 7,38$ HV_{0,3}. Estos valores de las respuestas, consideradas como las mejores para el estudio realizado, están acorde con la reportada en la literatura y fueron obtenidas cuando la corriente se fijó en 800A y el voltaje en 40V

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto PEII N° 201100001089 Fabricación y Evaluación de Recubrimientos Cerámicos Termorrociados

para Aplicaciones a Altas Temperaturas en Componentes de Reactores de Reducción.

Al Instituto de Investigaciones de Materiales y Metalurgia (IIMM) de SIDOR. Laboratorio de Microscopia Electrónica.

A la empresa Plasmatec Ingenieros, C.A., Guarenas, Estado Miranda, Venezuela.

REFERENCIAS

- [1] Chen Y., Zhao X., Dang Y., Xiao P., Curry N., Markocsanc N., Nylenc P., (2015) "Characterization and understanding of residual stresses in a NiCoCrAlY bond coat for thermal barrier coating application" *Acta Materialia* 94:1–14.
- [2] Liang J.J., Wei H., Zhu Y.L., Sun X.F., Hu Z.Q., Dargusch M.S., X.D. Yao, (2011) "Influence of Re on the Properties of a NiCoCrAlY Coating Alloy" *J.Mater. Sci. Technol.* 27(5):408-414.
- [3] Agüero, A., (2007) "Recubrimientos Contra La Corrosión A Altas Temperatura Para Componentes De Turbinas De Gas" *Revista de Metalurgia* 43(5):384-398.
- [4] Nusair Khan A., Lub J., (2009) "Manipulation of Air Plasma Spraying Parameters for the Production of Ceramic Coatings" *J. Mater. Process. Technol.* 209:2508–2514.
- [5] Liscano S., Gil L., (2013) "Performance of air plasma spraying parameters in the fabrication of ZrO₂-10%Y₂O₃-18%TiO₂ thermal barrier coatings" *J. Physics: Conference Series* 466: 012008.
- [6] Ramachandran C.S., Balasubramanian V., and Ananthapadmanabhan P.V., (2011), "Multiobjective Optimization of Atmospheric Plasma Spray Process Parameters to Deposit Yttria-Stabilized Zirconia Coatings Using Response Surface Methodology" *J.Therm. Spray Technol.* 20(3):590–607.
- [7] Sulzer Metco (2011), "Nickel Chromium Aluminum Cobalt Yttria Composite Powder". Material Product Data Sheet.
- [8] Florin Ciofu (2011) "Influence of Thermal Barrier Type Ceramic Layer's Chemical Composition and Quick Thermal Shock on their Porosity and Adherence" *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability* 1(7):19-24.
- [9] Fleury E., Lee S.M., Kim W.T., Kim D.H., (2000) "Effects of air plasma spraying parameters on the Al±Cu±Fe quasicrystalline coating layer" *J.Non-Crystalline Solids* 278:194-204.