

ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES Y MICROFISURACIONES EN RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS OBTENIDOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA POR LLAMA EMPLEANDO PRUEBAS DE EMISIÓN ACÚSTICA

*C. Ferrer¹, P.A. Maita³, M.P. Guillamón¹, F. Salas¹, J. Orozco¹, A. Corbí¹, B.A. Giner¹
M.A. Pérez-Puig¹, K.A. Habib²*

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
*cferrer@mcm.upv.es;; mpascual@mcm.upv.es; fisavi@doctor.upv.es; jaormes@cst.upv.es;
adcorcab@mcm.upv.es; balonso@mcm.upv.es; mipepui@mcm.upv.es*

² Departamento de Ingeniería de Materiales. Universidad Jaume I. Castellón.
razzaq@esid.uji.es

³ Departamento de Tecnología Mecánica. I.U.T.J.A.A.. El Tigre. Estado Anzoátegui. Venezuela.
pedmai@doctor.upv.es

RESUMEN

El desarrollo de mejoras en las propiedades superficiales de los materiales ha influido en el campo de la competitividad, producción de calidades y surgimiento de técnicas de recubrimientos, dependiendo de la adaptabilidad del recubrimiento a la técnica, nivel de adherencia, disponibilidad y costo. La proyección térmica por llama es una alternativa de bajo costo para reparaciones de partes desgastadas. Un requisito en la proyección térmica es la adherencia entre recubrimiento – sustrato. Para evaluar la adherencia se ensayaron las probetas recubiertas con polvos de aleaciones cerámicas sometidas a esfuerzos de cizalladura para conseguir deslizamiento cortante en la interfase del recubrimiento – sustrato. En este estudio, se valora la adherencia a la cizalladura de los recubrimientos cerámicos proyectados sobre sustrato de acero en función del contenido de carburos, temperatura y rugosidad del sustrato; el objetivo es estudiar las deformaciones y microfisuraciones internas previas a la rotura a través de las respuestas a los esfuerzos de cizalladura usando emisión acústica.

ABSTRACT

The development on improvements in the superficial properties of materials has influenced the field of competitiveness, improvement of quality and emergence of coating techniques, depending on the adaptability of the coating to the technique, level of adherence, availability and cost. The flame spray technique is an alternative of low cost for repairs of damaged parts. A requirement of the flame spray technique is the adherence between coating and substratum. To evaluate the adherence, testing samples were coated with ceramic powders and subjected to tangential forces in order to obtain the breakage of the coating - substratum interface. In this study the adherence between the coating and the steel substratum is studied in relation to the content of carbides, temperature and roughness of the substratum; the aim of this report is to study the deformations and internal micro-fractures that appear before the breakage by means of the response to the tangential forces using the acoustic emission technique.

PALABRAS CLAVE: Recubrimientos cerámicos, Emisión acústica, Fractura.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de proyección por llama tiene su origen en los primeros años de 1900 y se acepta generalmente como fecha de nacimiento la de la invención de un proceso de metalización por Dr. Max Ulrick Schoop, de Zurich, quien tuvo la idea de que un chorro de partículas en estado líquido proyectadas sobre un material, podría crear una capa [1]. La proyección por llama o FS (flame spray); es la forma más antigua de proyección térmica denominada “proceso frío”, concerniente al material del sustrato que está revestido y

es donde se encuentra el punto más bajo de temperatura, el cual permanece sin modificaciones, cambios metalúrgicos y distorsiones. En este proceso de proyección térmica por llama el material en forma de polvo es alimentado directamente hacia la pistola, donde es fundido en una llama de combustión realizada en el aire (ambiente) de una mezcla gas comburente (oxígeno O₂) y gas combustible (acetileno C₂H₂), para producir una fuente de calor o llama, utilizándose el aire comprimido para proyectar las partículas fundidas sobre el sustrato, donde fluyen juntas y solidifican proporcionando una capa [2, 3, 4].

En el campo industrial de las matricería existe actualmente un problema generado en las operaciones del trabajo en frío de deformaciones y rotura, debido a esfuerzos de cizalladura, modificaciones de medidas por altos esfuerzos y rozamiento en su servicio durante su carrera de producción, causando la acción de desgaste en la región de deslizamiento de la chapa con la matriz; por lo cual el estudio tratará de la reparación de partes desgastadas de matrices de embutición.

2. OBJETIVO.

Estudiar las deformaciones y microfisuraciones en recubrimientos cerámicos obtenidos por proyección térmica por llama empleando pruebas de emisión acústicas en la composición química de 30%CW – 70%Ni sobre sustrato de acero al carbono F-1110.

3.- METODOLOGÍA.

En los pasos experimentales se describirán: 3.1. Problema, 3.2. Proyección Térmica y 3.3. Planificación.

3.1.- PROBLEMA.

En el enfoque del problema industrial de matricería como consecuencia de las deformaciones y a la rotura por esfuerzos de cizalladura cuando cumplen sus funciones de trabajo, se tiene en cuenta:

Los recubrimientos aportan características que determinan el rendimiento y la duración útil, reduciendo los desgastes [5, 6], minimizando la adherencia del material de la chapa embutida [7]; mejorando algunas propiedades que incrementan la resistencia a cizalladura [8, 9, 10].

Las matrices en sus actividades están sometidas fundamentalmente en su borde a esfuerzo y movimiento durante su servicio, los cuales causan desgastes y posiblemente fisuras, lo que trae como consecuencia reparar la matriz o en caso extremo de rotura reemplazarla por una nueva.

En las aplicaciones a matrices para lograr obtener un determinado grado de rendimiento se requieren ciertas características como: a.) elasticidad para poder soportar los esfuerzos en la fase de arranque y distensión; b.) dureza de núcleo para evitar las roturas durante el servicio; c.) dureza superficial sobre todo el borde para reducir su desgaste [8] y d.) menor coeficiente de rozamiento, por adquirir un elevado pulido, para elevar la velocidad del proceso sin que sufra quemadura el borde de la matriz [9, 10]. En las matrices es necesario: a.) características que determinen un grado de rendimiento; b.) reducir al mínimo la adherencia de las partículas de metal trabajado [5] y c.) minimizar las roturas o tratar de impedir las.

En las operaciones de trabajo en frío, y deformaciones complejas permanentes del material sometido a esfuerzos de cizalladura, para los procesos de matricería, deberán cumplirse en las partes matriciales: a.) un buen acabado superficial del punzón y la matriz, en especial, las superficies donde cambia de forma el material; b.) un redondeo en el borde de la matriz y, en menor medida, en el radio del punzón [6] y c.) una lubricación que facilite el proceso [11, 12].

3.2. PROYECCIÓN TÉRMICA.

La proyección térmica por llama usando polvos pertenece a los procesos de combustión que emplea la energía química de gases comburente y combustible para calentar el material a proyectar [13]. En este proceso, las aleaciones cerámicas de WC-Ni en formas de polvos, alimentaron a un equipo que activa la energía química generando el calor necesario por gases combustibles, bajo condiciones atmosféricas normales, calentándose hasta pasar a plástico o fundido y acelerado con gas comprimido, como partículas individuales en forma de gotas que impactan sobre la superficie en este caso de estudio precalentada del sustrato [14, 15], aplastándose y formando capas delgadas, que se incrementan superponiéndose partículas, adhiriéndose a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas. Finalmente se solidifica en lo que es el recubrimiento de estructura laminar, heterogéneo que contiene cierto grado de porosidad [16, 17, 18, 19], “ver el proceso de proyección térmica a la llama, figuras 1. y 2.”.

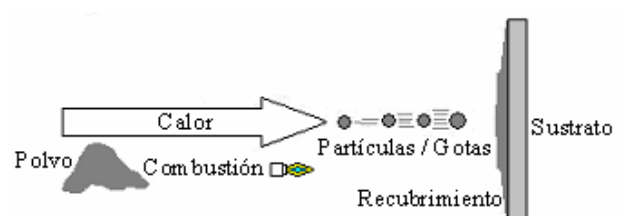


Figura 1. Esquema del Proceso de Proyección Térmica por llama.



Figura 2. Proyección Térmica a la llama.

3.3.- PLANIFICACIÓN.

Teniendo presente el objetivo de este trabajo, se plantea el estudio de las deformaciones y microfisuraciones en recubrimientos cerámicos obtenidos empleando proyección térmica por llama depositada sustrato de acero en función del contenido de carburos, temperatura y rugosidad del sustrato. Para realizar los experimentos se emplearon probetas cilíndricas de diámetro 30 mm, sustrato de acero al carbono F-1110, según la UNE. Para realizar la proyección por llama (flame spray), el recubrimiento sobre el sustrato, se emplean polvos micro-pulverizados de aleación en base Ni/WC con relación de 70/30 en tanto % de peso, agregándose capa de anclaje de Ni. El tipo de soplete para proyectar tiene la especificación Castodyn DS 8000, y los gases utilizados son 10 O₂ y 0,7 C₂H₂ [bar.].

El montaje utilizado en el ensayo de cizalladura, para cada experimento, se muestra en la “figura 3.”, donde se aprecia la probeta finalizada en forma cónica, para tener mínima área y por ente contacto más estable con la mordaza de la máquina de ensayo, Instron, la carga es de tipo de compresión aplicada en forma perpendicular y centrada sobre la probeta en el área mínima transversal, para contar con la estabilidad en este ensayo. También se ilustra la forma como se introduce el otro extremo de la probeta en la pieza cilíndrica hueca cónica fabricada o matriz de corte, que sirve para realizar el cizallamiento del recubrimiento proyectado sobre el sustrato de acero.

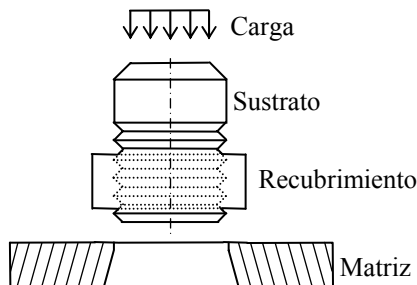


Figura 3. Esquema del Montaje para la Probeta del Ensayo de Cizalladura.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En el progreso de los resultados de los experimentos y los análisis se consideraran las variables: como rugosidad un filete roscado a 90° y profundidad 0,75 mm, temperatura de precalentamiento del sustrato de 100 °C y un contenido de polvos micro-pulverizados de Ni/WC con relación de 70/30 en tanto por ciento en peso. A continuación se muestra los resultados experimentales obtenido cuando se ha ensayado la probeta en cuatro cuadrantes de área y de diámetro de 30 mm; las dimensiones del material del recubrimiento proyectado son de longitud de 15 mm y ancho de 15 mm, donde se han designados las deformaciones con “ δ ”, las cargas de cizalladura con “P” y las cantidades

de señales captadas por emisión acústica o impactos “I” y tiempo con “t”. Estos parámetros “P”, “ δ ” y “Cuentas” se han tomados en los diagramas respectivos para los puntos 1 y de ruptura R, “como se señalan en las figuras 4., 5., 6. y 7..”

4.1. ENSAYO DE CIZALLADURA.

Con el objeto de evaluar la adherencia, se aplica el ensayo de cizalladura, en el cual se carga la probeta recubierta de Ni/WC apoyada sobre una matriz de corte hasta fractura del recubrimiento.

4.1.1. ANÁLISIS DEL DIAGRAMA CARGA DE CIZALLADURA VERSUS DEFORMACIONES.

En este diagrama “P- δ ” “figura 4.”, se observa la zona entre los puntos 0 y 1 de acomodamiento y poca compresión, donde las cargas y las deformaciones son bajas teniendo poca influencia y luego se muestra la zona pseudo-elástica entre los puntos 1 y la ruptura R, donde las cargas de cizalladura son directamente proporcionales, es decir, aumentan las cargas mientras ocurren las deformaciones.

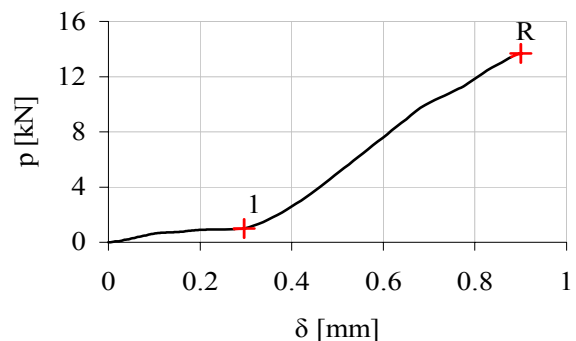


Figura 4. Diagrama P- δ .

4.1.2. ANÁLISIS DEL DIAGRAMA CARGA DE CIZALLADURA VERSUS TIEMPOS.

En este diagrama “P-t” “figura 5.”, se representa la zona 0 – 1 de acomodamiento, donde las cargas y los valores de los tiempos transcurridos son bajos teniendo poca influencia y luego se muestra la zona pseudo-elástica entre 1 – R, donde las cargas de corte son directamente proporcionales, es decir, se incrementan las cargas mientras transcurren los tiempos.

4.2. LA TÉCNICA DE EMISIÓN ACÚSTICA.

Por medio de esta técnica se detecta la emisión acústica en el proceso de deformaciones y microfisuraciones, cuando el recubrimiento de la probeta es sometido a cortadura.

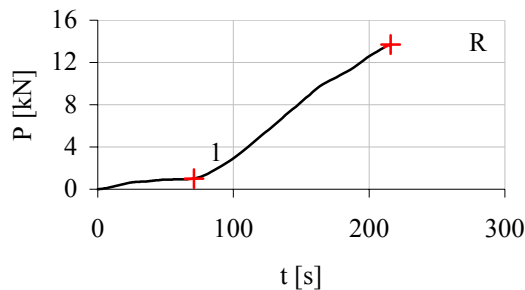


Figura 5 Diagrama P-t.

4.2.1. ANÁLISIS DEL DIAGRAMA IMPACTOS VERSUS TIEMPOS.

En este diagrama “I-t” “figura 6”, se muestra la zona de acomodamiento entre los puntos 0 y 1, donde ocurren pocos impactos (I) debido al contacto incompleto de la probeta con la mordaza móvil de la máquina de ensayo y a los valores menores de los tiempos transcurridos (t). Y también la zona entre los puntos 1 y la ruptura R, donde los impactos registrados se originan por microfisuras y deformaciones; luego el incremento de las deformaciones internas en el material del recubrimiento Ni/WC, generan nuevas microfisuras, grietas y propagación de éstas, emitiendo más impactos acústicos cuanto más se aproxima a la ruptura del recubrimiento por cizallamiento y donde sucede inmediatamente la caída de los impactos. En la zona 1-R se observa que los impactos crecen, luego tienen pocas variaciones y finalmente disminuyen tras la rotura de la probeta proyectada.

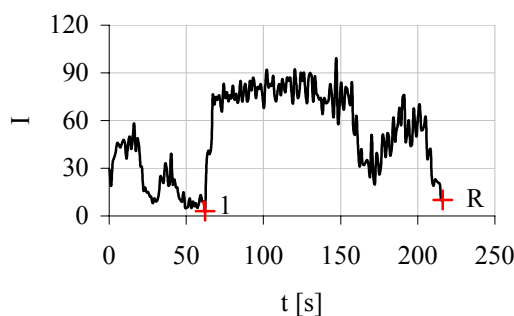


Figura 6 Diagrama I-t.

4.2.2. ANÁLISIS DEL DIAGRAMA CUENTAS VERSUS TIEMPOS.

En este diagrama “Cuentas-t” “figura 7”, se observa que en la zona 0 – 1 los impactos o señales tienen pocas cuentas debido a las menores amplitudes de las señales emitidas acústicamente durante el ensayo de cortadura en el tiempo transcurrido. En la zona 1 – R las cuentas detectadas por emisión acústica se deben a las micro-

fisuras y deformaciones, que sigue aumentando debido a que las deformaciones internas en el material del recubrimiento Ni/WC generan nuevas microfisuras, grietas y propagación de éstas, emitiendo más cantidad de cuentas acústicas. Cuanto más se aproxima a la fractura del recubrimiento por corte más aumenta la cantidad de cuentas.

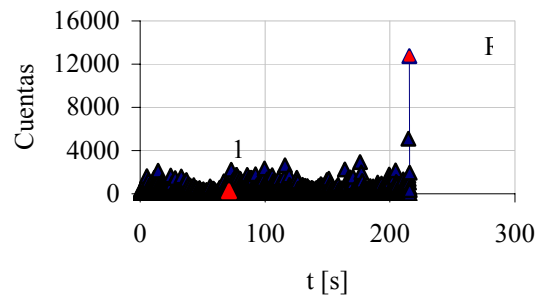


Figura 7. Diagrama Cuentas-t.

4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIAGRAMAS P-δ, P-t, I-t y Cuentas-t.

Los diagramas “P-t”, “figura 5.”, “I-t”, “figura 6.” y “Cuentas-t”, obtenido en el proceso de deformaciones y microfisuraciones internas previas a la rotura final, tienen en común el eje de las abscisas el tiempo transcurrido, en cuanto al eje de las ordenadas en el diagrama “P-t”, las cargas de cizalladura y en el diagrama “I-t”, los impactos se relacionan en cuanto a que si la carga de cizalladura es alta los impactos son elevados.

En estos diagramas “P-δ”, “figura 4.”, “P-t”, “figura 5.”, “I-t”, “figura 6.” y “Cuentas-t” “figura 7.”, se aprecia una zona de acomodamiento entre los puntos 0-1 de poca inclinación y una zona 1-R o pseudo-elástica con mayor pendiente. A lo largo de la zona 1-R suceden la evolución de las deformaciones y microfisuraciones, originándose nuevas microfisuras y propagación hasta la ruptura.

El diagrama “I-t”, “figura 6.”, ilustran los diferentes picos o bajadas y elevaciones de cada impacto, representando los picos diferentes cambios como concavidades y pendientes en las curvas de los diagramas “P-t”, “figura 5.” y “I-t”, “figura 6., debido a la adherencia de la interfase sustrato – recubrimiento.

En el diagrama “P-δ”, “ver figura 4.”, ocurre en la zona 1-R o pseudo-elástica la forma lineal con pendiente positiva donde las cargas son directamente proporcionales a las deformaciones.

En el diagrama “Cuentas-t” “figura 7.”, en la zona 1-R, específicamente para el punto de ruptura R sucede una elevación brusca de la cantidad de cuentas debido a las

señales de impactos generadas en la rotura por cortadura de probeta proyectada.

5.- CONCLUSIONES.

- El estudio de las deformaciones y microfisuraciones en recubrimientos cerámicos obtenidos por proyección térmica por llama empleando pruebas de emisión acústica en la composición química de 30%CW – 70%Ni sobre sustrato de acero al carbono F-1110, resulta una alternativa de bajo costo para reparaciones de partes desgastadas de las matrices. Estos recubrimientos cerámicos proyectados en corto tiempo, son ventajosos en estas aplicaciones y cumplen con las necesidades de las funciones de las matrices.

- De los ensayos de cizalladura empleando la emisión acústica en probetas proyectadas con aleaciones cerámicas de Ni/WC, se señalan la zona de acomodo de pocas deformaciones e impactos y la zona pseudo-elástica y de crecimiento de los impactos mostrado en los diagramas cargas e impactos versus tiempos transcurridos.

- Entre los ensayos de cizalladura y de emisión acústica la iniciación y propagación de micro-fisuras ocurridas por las deformaciones y fractura mostrada en el diagrama cargas de cortadura versus deformaciones y apreciada por la oscilación de la intensidad de cada impacto en el diagrama impactos versus tiempo transcurrido e indicativa de las cuentas detectadas por los sensores en la emisión acústica cuando se carga sometiendo la probeta proyectada al ensayo de cizalladura

- Sucede el incremento de la cantidad de señales de impactos en cuanto las cargas de cizalladura son más elevadas sobre las probetas, hasta alcanzar la carga de rotura e inmediatamente la caída de las señales de impactos, pero la mayor cantidad de cuentas se presenta para el punto de ruptura por corte de la probeta.

- A lo largo de la zona I–R ocurre la evolución de las deformaciones y microfisuraciones, originándose nuevas micro-grietas y propagación hasta la ruptura.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación y Ciencia, Dirección General de Investigación por la ayuda prestada a través del proyecto MAT-2004-04909 al equipo investigador.

REFERENCIAS

[1] Hermanek, F. J., *Thermal Spraying*, 2004.

[2] Kim, H.-J.; Hwang, S.-Y.; Lee, C.-H. and Juvanon, P.; *Assessment of wear performance of flame sprayed*

and fused Ni-based Coatings, Surface and Coatings Technology 172, pp. 262 – 269, 2003.

[3] Abello Linde, S. A., *Proyección Térmica*, pp. 1 - 20, 2004,

[4] Reina G., M.; *Soldadura de los Aceros*, Weld-Work, S. L., 2003.

[5] Carreras V., L.; Bueno S., S. y Montalà G., F., *Recubrimiento Duros Obtenidos por Procesos C.V.D., T.R.D.D., P.V.D.*, 1998.

[6] Fumás F., D. y Montalà G., F., *Evaporador para Reactor de Recubrimientos*, Proyecto, 30 de Junio de 1998.

[7] Apraiz B., J.; *Aceros Especiales y otras Aleaciones*, 1971.

[8] Grupo TTC, *Deposición Química en Fase Vapor*, Tratamiento Térmicos, Recubrimientos Avanzados, pp.1 – 8, 2002.

[9] Carreras V., L.; Bueno S., S. y Montalà G., F., *Aplicaciones Decorativas de las Técnicas de PVD*, 2003.

[10] Guilemany, J. M.; Fernández, J.; Delgado, J. y M^a Demestre, J.; *Recubrimientos de Acero Inoxidable Obtenidos por Proyección Térmica HVOF y su Resistencia a la Corrosión*, CPT, pp. 1 – 13, junio 2002.

[11] Leonetti, R., *Desgaste de Cojinetes de Contacto Plano – I º parte*, Revista N º 1, pp. 6 – 8, junio 2000,

[12] Koon, A. P., *Low Friction Wear Resistant Composite Coating*, Surface Technology Group, Process Technology Division, pp. 1 – 8, 2000.

[13] Juárez M., C.; Barba P., A.; Vázquez V., A.; Valdés, E. y Damborenea G., J., *Modificación de Recubrimientos Obtenidos por Proyección Térmica Mediante Haces de Alta Densidad Energética*, Simposio: La Investigación en la Facultad de Ingeniería, Madrid - España, 2004.

[14] Juárez M., C.; Barba P., A.; Vázquez V., A.; Valdés, E. y Damborenea G., J., *Modificación de Recubrimientos Obtenidos por Proyección Térmica Mediante Haces de Alta Densidad Energética*, Simposio: La Investigación en la Facultad de Ingeniería, Madrid - España, 2004

[15] Berndt, M. L. and Berndt, C. C., *Thermal Spray Coatings*, pp. 1 – 11, 2003.

[16] Guilemany, J. M.; Navarro, J.; Miguel, J. M.; Fernández, A.; Miguel, J.R. y Fernández, J.; *Optimización de recubrimientos de Ni-Grafito con*

propiedades autolubricantes obtenidos mediante tecnologías de proyección térmica plasma atmosférico (APS), CPT, pp. 1 – 4, mayo 2003.

- [17] Guilemany, J.M.; Nin, J. y Miguel, J.R.; *Recubrimientos de Ni20Cr Obtenidos Mediante Proyección Térmica: Optimización Mediante Monitorización On-Line*, CPT, pp. 1 – 7, Marzo 2004.
- [18] Kim, H-J.; Hwang, S-Y.; Lee, C-H. and Juvanon, P.; *Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based Coatings*, Surface and Coatings Technology 172, pp. 262 – 269, 2003.
- [19] Pawlowski, L., *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, 413 pag., 1995.