

APLICACIONES Y CARACTERÍSTICAS DE UN PLASMA FOCUS COMO FUENTE PULSADA DE RAYOS X DE ALTA ENERGÍA

V. Raspa*, L. Sigaut, R. Llovera**, R. Vicytes, A. Clause y C. Moreno

Depto de Física, FCEyN-UBA, PLADEMA-CNEA, EST-IESE e INFIP-CONICET
e-mail: moreno@df.uba.ar

Utilizando radiación X pulsada de alta energía, provista por un equipo Plasma Focus de 4.7 kJ operado con mezclas de deuterio y argón como gas de trabajo, se obtuvieron imágenes introspectivas de piezas metálicas en rápida rotación, ilustrando así la potencial aplicación de equipos Plasma Focus para la inspección no invasiva de objetos metálicos en movimiento. Mediante el análisis de la atenuación media que sufre la radiación estudiada, en muestras de diferentes metales, se obtuvo una energía efectiva del orden de 100 keV.

Using high energy, pulsed X-rays, generated by a 4.7 kJ Plasma Focus operated with deuterium - argon admixtures, introspective images of fast rotating metallic pieces were obtained. This illustrates the potential application of Plasma Focus devices for non invasive scanning of moving metallic objects. By analyzing the mean attenuation of the studied radiation in different metals, an effective energy of 100 keV was obtained.

I. INTRODUCCIÓN

Los equipos Plasma Focus son sistemas donde se genera y comprime un plasma gaseoso mediante una descarga eléctrica capacitiva de alta potencia. En ellos se producen haces energéticos pulsados de iones y electrones, radiación de amplio espectro, y, si se trabaja con una atmósfera de deuterio, también se emiten pulsos de neutrones de fusión (2.45 MeV). El interés actual de las investigaciones que se realizan con estos equipos se orienta hacia la investigación básica, centrada principalmente en la física de plasmas densos, y la aplicada, que se dedica fundamentalmente a la búsqueda de aplicaciones no-conventionales. Esta segunda área ha tenido un considerable desarrollo en los últimos años, dando lugar al aprovechamiento del haz de iones para el recubrimiento de metales^(1,2), al uso tanto de los rayos X, como del haz de electrones emitidos, para realizar microlitografías^(3,4), a la radiografía de especímenes biológicos⁽⁵⁾, y más recientemente, a la obtención de imágenes introspectivas de objetos metálicos estáticos^(6,7) y al uso de la emisión neutrónica para la detección no intrusiva de compuestos ricos en hidrógeno^(8,9).

En la primera parte del presente trabajo, se presenta la aplicación de un Plasma Focus como fuente pulsada de radiación X de alta energía para obtener imágenes introspectivas de piezas metálicas en movimiento rápido. Como consecuencia de que la duración del pulso de rayos X emitido por estos equipos es de aproximadamente 50 ns, aquellas radiografías obtenidas empleando un Plasma Focus como fuente de radiación, presentan un tiempo de exposición seis órdenes de magnitud menor que las de uso convencional. Es esta última característica junto con el alto grado de penetración que la radiación emitida tiene en la materia,

la que permite obtener imágenes nítidas de objetos metálicos en movimiento.

En la segunda parte, se presenta una determinación experimental de la energía efectiva de la radiación que permite obtener las radiografías mencionadas. El método está basado en el estudio de la atenuación que sufre la radiación de interés al penetrar diferentes muestras metálicas. Primeramente se obtiene un coeficiente de atenuación efectivo para cada metal estudiado, y a partir de ellos, se infiere una energía representativa de la radiación incidente.

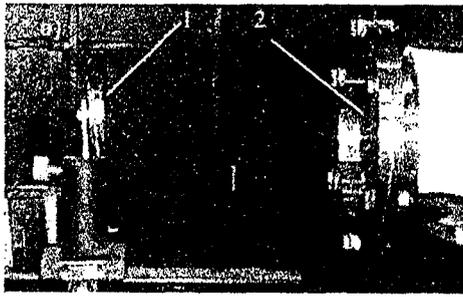
II. MONTAJE EXPERIMENTAL

Como fuente de radiación X se utilizó el equipo Plasma Focus GN1, cuya descripción detallada puede hallarse en la referencia⁽¹⁰⁾. Está compuesto básicamente por un banco de capacitores de 10.5 μ F cargado a 30 kV (4.7 kJ). Los electrodos están formados por un ánodo hueco de cobre, y un cátodo compuesto por barras de bronce. Ambos están separados en su base por un aislante de vidrio Pyrex, y colocados en una cámara de acero inoxidable de 1 dm³. Tras realizar la descarga, desde el foco se emite un haz colimado de electrones cuya desaceleración, producto del impacto del mismo sobre el fondo del ánodo, da lugar a la emisión de rayos X de alta energía⁽¹¹⁾. Como gas de trabajo, se utilizaron dosificaciones de un 2.5 % de argón en deuterio, a presiones totales de 3.5 o de 4 mbar.

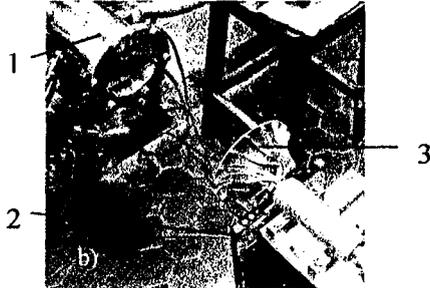
En las figuras 1.a y 1.b pueden verse dos montajes diferentes utilizados para obtener imágenes de objetos metálicos en movimiento rápido. Un rulemán de acero inoxidable montado en un posicionador metálico provisto de un eje horizontal, sobre el que su parte externa puede girar a 2820 rpm, fue una de las piezas a radiografiar. En la figura 1.b puede verse el montaje experimental implementado para radiografiar una turbina de aluminio,

* Becaria de la Fundación Antorchas (Proyecto 14068-24).

** Becario doctoral CONICET.



- 1) Rulemán en el posicionador con el eje horizontal.
- 2) Cámara de descargas.



- 1) Cámara de descargas.
- 2) Portaplaquetas.
- 3) Turbina.

Figura 1. Montaje experimental utilizado (a) con rulemán (b) con turbina.

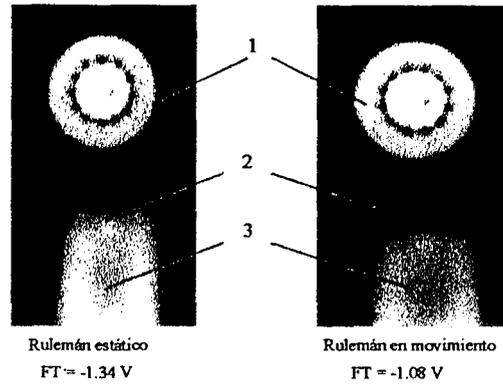
provista de un motor capaz de hacerla girar sobre su eje con una velocidad de aproximadamente 6120 rpm. Se distinguen con claridad tanto la distribución sobre la turbina de álabes de distinto tamaño y contorno, como el posicionamiento del portaplaquetas para esta configuración.

La distancia cámara-película fue fijada en 17 cm y 34 cm para el montaje con el rulemán y la turbina, respectivamente. La determinación de este parámetro experimental surge de un compromiso entre la intensidad de la radiación incidente sobre la película y la homogeneidad en la impresión de la misma, por ello se ajusta según sea conveniente a partir de las características del objeto a radiografiar. En ambas ocasiones se utilizó una placa comercial Curix Agfa 13 x 18 cm y se siguió el procedimiento descrito en la referencia⁽⁷⁾.

III. RESULTADOS

Se muestra en la figura 2, una comparación entre dos imágenes del rulemán, estático y en rotación respectivamente. Se indican al pie, la distancia cámara-película (D) así como también la presión de llenado (P) y el gas de trabajo. Pueden apreciarse en ambas imágenes, zonas con distintas tonalidades correspondientes a los diferentes espesores de la pieza.

En ambos casos se ven claramente las componentes esféricas en su interior. El círculo claro que se distingue en el centro de las imágenes circulares corresponde a una vista frontal del eje de rotación. La diferencia de



D = 17 cm, P = 4 mbar, D₂ = 100 %, ω = 2820 rpm

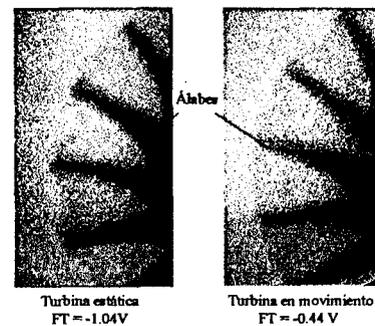
- 1) Rulemán de acero inoxidable.
- 2) Soporte de Aluminio.
- 3) Posicionador metálico.

Figura 2. Comparación entre imágenes de un rulemán de acero inoxidable estático y en movimiento rápido.

intensidad en el área del posicionador (zona inferior de las imágenes), indica una cavidad. En la parte superior del mismo se distingue una zona circular más iluminada, la cual puede asociarse al tornillo que fija el soporte de aluminio al posicionador.

La figura 3, muestra la comparación entre el negativo de la imagen tomada a la turbina estática y el correspondiente a la misma en rotación. Se señalan al pie, la distancia cámara-película, la presión de llenado y la composición del gas de trabajo. En cada una de las imágenes pueden apreciarse zonas con distintos tonos de gris como consecuencia de que la pieza presenta diferentes espesores. En ambos casos, se distinguen con claridad la distribución de los álabes sobre la turbina, los contornos y muescas presentes en la misma.

Las diferencias de tonalidad global y contraste que se observan en las imágenes que muestra la figura 3, son producto de que la eficiencia de la fuente en la



D = 34 cm, P = 3.5 mbar, D₂ = 97.5 %, Ar = 2.5 %, ω = 6121 rpm

Figura 3. Comparación entre imágenes de una turbina de aluminio estática y en movimiento rápido de rotación.

producción de Rayos X no es constante para disparos sucesivos y por lo tanto, aunque se prefijó la distancia cámara-película en 34 cm para tomar ambas imágenes, las placas no fueron irradiadas con igual intensidad promedio. Al pie de las imágenes que muestra la figura 3, se hace referencia a la amplitud del fotopico (FT) para las emisiones con las cuales se obtuvieron cada una de ellas. Cuanto mayor es la amplitud de este parámetro, más intensa es la irradiación de la película y viceversa. Hasta el momento se ha obtenido una resolución global de (12.2 ± 0.5) píxeles en la imagen digitalizada por mm medido en la pieza.

IV. ENERGÍA EFECTIVA

Para determinar la energía efectiva de la radiación que permite obtener imágenes como las mostradas, se estudió la atenuación relativa que esta radiación sufre en placas metálicas de espesor x predeterminado. Llamando I_0 a la intensidad de radiación que llega al objeto, se tiene, para una emisión continua:

$$I_0 = \int_0^{\infty} S(E) dE \quad (1)$$

donde $S(E)$ es la densidad espectral emitida y E la energía de los fotones involucrados. La intensidad $I(x)$ que tiene la radiación luego de atravesar una muestra de espesor x es:

$$I(x) = \int_0^{\infty} S(E) e^{-\mu(E)x} dx \quad (2)$$

donde $\mu(E)$ es el coeficiente de atenuación lineal del material. Luego, la relación entre la intensidad transmitida y la incidente está dada por:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{\int_0^{\infty} S(E) e^{-\mu(E)x} dx}{\int_0^{\infty} S(E) dx} \quad (3)$$

La expresión (3) permite definir un coeficiente de atenuación efectivo $\mu^* \equiv \mu(E^*)$ como promedio pesado de las atenuaciones $\exp[-\mu(E)x]$:

$$\frac{I(x)}{I_0} = e^{-\mu^*x} \quad (4)$$

actuando la densidad espectral como factor de peso. Fijado tanto el tipo de material (lo que define una relación $\mu(E)$), como el espesor de la muestra, la medición del cociente $I(x)/I_0$ permite, a través de la ecuación (4), estimar un coeficiente de atenuación efectivo μ^* y a partir de él, inferir una energía efectiva E^* .

Desde el punto de vista experimental, el cociente $I(x)/I_0$ se determina a partir de la razón entre el nivel de gris correspondiente a una radiografía de la muestra, y el nivel de gris, que en esa misma radiografía, produce la intensidad incidente I_0 , que no atraviesa la muestra. Los

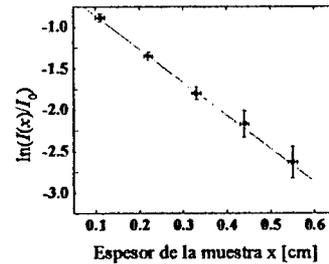


Figura 4. Gráfico del $\ln(I(x)/I_0)$ en función del espesor x para 5 muestras de cobre. En línea continua se presenta el ajuste lineal de los datos.

niveles de grises se obtienen a su vez mediante el escaneo de la radiografía.

Asumiendo una asignación lineal de niveles de gris, $N(x)$, con el cociente $I(x)/I_0$ se tiene:

$$N(x) = N_{max} - (N_{max} - N_{min}) \frac{I(x)}{I_0} \quad (5)$$

siendo N_{max} y N_{min} el nivel de gris máximo y mínimo obtenidos en la radiografía, respectivamente. Para un scanner de 8 bits, N_{max} es próximo a 255 (correspondiente al tono más blanco de la radiografía, obtenido por ejemplo, bloqueando la radiación incidente sobre un área predeterminada de la película mediante el uso una placas de plomo de 5 mm de espesor) y N_{min} es próximo a 0 (negro absoluto, correspondiendo a rayos que incidieron sobre la película sin pasar por la muestra). La validez de la linealidad propuesta en la ecuación (5) debe ser verificada experimentalmente. De esta ecuación resulta:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{N_{max} - N(x)}{N_{max} - N_{min}} \quad (6)$$

De las ecuaciones (4) y (6) se obtiene μ^* , para cada material estudiado, a partir de niveles de gris medidos para diferentes espesores de dicho material.

Por otra parte, de acuerdo con la ecuación (4), un gráfico del $\ln\{[N_{max} - N(x)] / (N_{max} - N_{min})\}$ en función de x permite verificar la linealidad referida anteriormente.

Utilizando al GN1 como fuente de radiación se obtuvieron radiografías de muestras, de calidad analítica, de los siguientes metales y espesores: cadmio (0.11; 0.22; 0.30) cm, cobre (0.11; 0.22; 0.33; 0.44; 0.55) cm, níquel (0.16; 0.27; 0.43; 0.54) cm y titanio (0.36; 0.44; 0.56; 0.68) cm. Los espesores fueron medidos con un calibre que aprecia 0.01 cm. El posterior escaneo de las radiografías brinda los correspondientes niveles de gris.

En la figura 4 se muestra un gráfico del $\ln(I(x)/I_0)$ en función del espesor x para las cinco muestras de cobre, que permite dar una justificación experimental de la linealidad asumida en la ecuación (5). De la pendiente de dicho gráfico se obtiene $\mu^* = (3.90 \pm 0.12) \text{ cm}^{-1}$ y a partir de las tablas de la referencia⁽¹²⁾ se obtiene $E^* = (101 \pm 15) \text{ keV}$. Del mismo modo se procede con los restantes tres metales empleados.

Los coeficientes de atenuación lineales efectivos resultantes para los cuatro materiales considerados se

consignan en la tabla 1. Puede observarse que de los materiales estudiados, es el cadmio el que produce mayor atenuación, y que el cobre y el níquel lo hacen en similar medida. También se observa que la energía efectiva inferida para la radiación de interés, es del orden de 100 keV, cualquiera sea el metal considerado en el análisis.

Material	$\mu^*(\text{cm}^{-1})$	$E^*(\text{keV})$
cadmio	9.48 ± 0.13	103 ± 13
cobre	3.90 ± 0.12	101 ± 15
níquel	3.35 ± 0.04	104 ± 14
titanio	1.56 ± 0.03	99 ± 9

TABLA 1: Coeficientes de atenuación y energías efectivas de la emisión X, obtenidas con los diferentes materiales estudiados.

La fuente de incerteza de los resultados expuestos en la tabla 1 es, por una parte, de naturaleza aleatoria, originada en la estimación de los niveles de gris involucrados en la expresión (6), y por otra, de tipo instrumental, proveniente de la medición de los espesores x. La repetición del experimento arroja valores concordantes con los ya consignados. La dependencia de la energía efectiva de emisión, con el material del fondo del ánodo, está actualmente en proceso de estudio. Lo mismo debe decirse respecto de la dependencia con la tensión de operación y la presión de trabajo.

V. CONCLUSIONES

Las imágenes de objetos metálicos en movimiento presentadas en este trabajo demuestran la posibilidad de emplear un Plasma Focus como fuente de radiación para radiografiar piezas metálicas en rápida rotación. Esta posibilidad permite el desarrollo de nuevas técnicas no invasivas de inspección introspectiva de piezas metálicas en movimiento. Corresponde señalar que no se encuentran en la bibliografía especializada, antecedentes de imágenes radiográficas introspectivas de objetos metálicos en movimiento.

El estudio de la energía efectiva de la radiación de interés arrojó valores concordantes con los que se encuentran en la literatura, obtenidos siguiendo métodos diferentes^(13,14). El procedimiento propuesto en el presente trabajo para determinar la energía efectiva tiene la particularidad de ser simple y de requerir elementos de fácil obtención en el mercado local, lo que facilita la realización de estudios comparativos con otros equipos.

Como continuación del presente estudio, se determinará experimentalmente la conveniencia de modificar el material del fondo del ánodo, como medio para variar la energía efectiva de emisión.

Agradecimientos: El presente trabajo contó apoyo económico de la Fundación Antorchas (Proyecto 14068-24), de la IAEA (TC Proj. ARG1026-11099L), del PLADEMA - CNEA y de la UBA (X074).

Referencias

- 1 - Feugas J, Llonch E, de González C and Galambos G. *J. Appl. Phys.* **64** (5), 2648-2651, (1988).
- 2 - Kelly H, Leponc A, Márquez A, Lamas D and Oviedo C. *Plasma. Sources Sci. Technol.*, **5** (4), 704-709, (1996).
- 3 - Lee S, Lee P, Zhang G, Feng X, Gribkov V, Liu M, Serban A and Wong T. *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **26** (4), 1119-1126, (1998).
- 4 - Lee P, Feng X, Zhang G, Liu M and Lee S. *Plasma. Sources Sci. Technol.* **6** (3), 343-348, (1997).
- 5 - Castillo-Mejia F, Milanese M, Moroso R, Pouzo J and Santiago M. *IEEE Trans on Plasma Sci.* **29** (6), 921-926, (2001).
- 6 - Moreno C, Clause A Martínez J, Llovera R and Tartaglione A. *Nukleonika*, **26**, (1), 33-34, (2001).
- 7 - Moreno C, Clause A, Vénere M, Martínez J, Barbuza R, del Fresno M, Llovera R, Tartaglione A, y Jaroszewicz S. *Anales AFA*, **12**, 94-97, (2000).
- 8 - Pouzo J, Milanese M, and Moroso R. *AIP Conf. Proc.*, **669** (1), 277-280, June 11, 2003.
- 9 - C. Moreno, A. Clause, J. Martínez, R. Llovera, A. Tartaglione, Vénere, R. Barbuza and M. del Fresno. *IX Latin American Workshop in Plasma Physics*, La Serena, Chile, AIP Conference Proc **563**, H. Chuaqui and M. Favre Eds, 300-305, Nov (2000).
- 10 - Moreno C, Martínez J, Bruzzone H y Clause A. *Anales AFA*, **11**, 142-144, (1999).
- 11 - Raspa V, Llovera R, Clause A y Moreno C. *Anales AFA*, **14**, 115-118, (2002).
- 12 - Hubbell J. and Seltzer S. Ionizing radiation division, Physics Laboratory. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, (1996).
- 13 - Mather J W. *Methods of Experimental Physics 9 B*, edited by H Lovberg and H R Griem, Academic Press, New York and London, pp. 187-249, (1971).
- 14 - Choi P, Deency C, Herold H and Wong C. *Laser and Particle Beams*, **8** (3), 469-476, (1990).