

EMISION ACUSTICA EN LA DEFORMACION PLASTICA DE MATERIALES
IRRADIADOS

S. MINTZER*, R. PASCUAL**, H. LESCANO***

* CNEA - Gerencia de Desarrollo _ Departamento Combustibles Nucleares

** National Research Council, Physics Division, Ottawa Canadá.

*** E.I.R. Physics Division. Wurenlingen, Suiza.

INTRODUCCION

La Emisión Acústica puede definirse como la generación de ondas elásticas de tensión, de baja intensidad, debido a la energía liberada en los rearrreglos estructurales de un material, producidos por un estado de tensiones. Las ondas son emitidas por los materiales en diversos procesos dinámicos tales como deformación plástica, transformaciones de fases, iniciación y propagación de fisuras, etc.

En el caso de estructuras metálicas, estas pueden evolucionar hacia su estado de menor energía desarrollando condiciones inestables localizadas mucho antes de que todo el sistema sea inestable. Así las tensiones pueden estar dentro del límite establecido en el diseño, sin embargo la región próxima a una fisura (preexistente o introducida durante el tratamiento mecánico) puede sufrir deformaciones plásticas localizada debido a concentración de tensiones generando ondas elásticas.

Métodos usuales para asegurar la integridad de recipientes de presión descansan sobre inspecciones periódicas, éstas se efectúan por la aplicación de una serie de técnicas. De acá que sea deseable contar con una técnica de monitoreo capaz de operar mientras el sistema esté funcionando (es decir que no sea necesario demostrarlo o detenerlo) que el monitoreo pueda efectuarse a distancias relativamente grandes y que pueda ser fácilmente automatizado. Estos hechos resultan aún más importantes en el caso de recipientes de presión nucleares, por limitaciones de acceso y restricciones de seguridad. Con tal propósito y debido a que la técnica de Emisión Acústica presenta potencialmente estas ventajas (1, 2, 3, 4, 5), en los

últimos años existe considerable interés en su desarrollo y los trabajos actuales en Emisión Acústica evolucionan en diferentes direcciones, a saber: estudios más detallados de la naturaleza microscópica de los procesos básicos de Emisión Acústica como ser análisis de amplitudes de pulso, contenido de frecuencias y características de propagación de las ondas elásticas de los diferentes procesos dinámicos en materiales que pueden producir Emisión Acústica, caracterización de las respuestas de Emisión en diferentes materiales y en diferentes condiciones; aumento de los niveles actuales de sensibilidad a la detección; eliminación por filtrado de señales extrañas a los procesos de interés (ruidos eléctricos y mecánicos); etc.

Con el objeto de estudiar el comportamiento de la Emisión Acústica en materiales irradiados se efectuaron ensayos de deformación por tracción y Emisión Acústica en la aleación Cobre - 1% Aluminio sometida a irradiación con diferentes dosis de neutrones. Se mostró una marcada tendencia de la actividad acústica con la presencia de defectos introducidos en la irradiación. Se analiza los resultados y se presenta un modelo sobre el comportamiento de los pulsos acústicos de dicho caso.

Procedimientos Experimentales

El material utilizado en los ensayos de tracción y Emisión Acústica es una aleación Cu-1%Al (porcentaje en peso). Esta se preparó a partir de Cobre de pureza 99,99% y Aluminio de pureza 99,99%, fundiendo dichos materiales en un crisol de grafito en un horno de alto vacío, posteriormente fué sometido a un tratamiento de homogeneización. A los lingotes obtenidos se les dió una reducción progresiva en el espesor mediante un tratamiento termomecánico consistente en laminado en frío y recocido en vacío ($< 10^{-4}$ Torr) en forma alterada. Las determinaciones de tamaño de grano final se efectuaron por el método de las intercepciones lineales (130 micrones). Se efectuó un control cuidadoso del mismo a fines de asegurar igualdad de tamaños de grano en las probetas de ensayo. Las dimensiones de las probetas fue en todos los casos de 1x3,2x35mm.

La irradiación de las probetas se efectuó con neutrones y los flujos integrados totales fueron estimados en: 3×10^{15} ; $1,3 \times 10^{16}$ y $2,5 \times 10^{17}$ neutrones/cm².

La Fig. 1 es un diagrama en bloques del equipo de Emisión Acústica. Las ondas elásticas de tensión generadas en el material son detectadas mediante un cristal piezo eléctrico del tipo PZT-5 (Zirconato-Titanato de Plomo) y son enviadas a un preamplificador de bajo nivel de ruido, a partir de allí las señales son filtradas mediante un filtro pasabanda, el que selecciona las señales que corresponden al rango 150-300 KHZ del espectro acústico. Por debajo de este intervalo existe considerable contribución del ruido ambiental (mecánico e hidráulico). Por encima ($> 1\text{M MHz}$) las ondas son fuertemente atenuadas en el material. Luego de filtradas las señales son nuevamente amplificadas mediante un amplificador secundario. Las señales resultantes son enviadas a un contador y grabador (este último si se desea un análisis posterior) y a un registrador X-Y el cual registra el número de cuentas acumuladas. La ganancia total del sistema es de 80 Db. También cuenta el equipo con un osciloscopio mediante el cual se puede seguir visualmente el comportamiento de la Emisión Acústica. El dispositivo anterior se construyó para mediciones de laboratorio. Para evaluación estructural existen equipos comerciales más sofisticados que pueden incluir analizadores de amplitud y de contenido de frecuencias y computadora para procesar los datos y localizar las fallas.

Los ensayos de deformación por tracción y emisión Acústica se efectuaron en una máquina Instron modelo TTM, en todos los casos a una velocidad de deformación de: $9,5 \times 10^{-4}$ seg

Resultados experimentales

La Fig. 2, muestra la relación entre el Número de Cuentas de Emisión Acústica acumuladas por unidad de volumen (N) vs. Deformación total (ϵ) a las diferentes dosis de irradiación consideradas ($\phi_t = 0,3 \times 10^{15}$, $1,3 \times 10^{16}$, $2,5 \times 10^{17}$). También se representa en la misma figura tensión aplicada (σ) vs. Deformación total para el material sin irradiar y para un flujo integrado de: $\phi_t = 0$ y $2,5 \times 10^{17}$

En dicho material y a dosis de neutrones relativamente bajas como las consideradas se observa un pronunciado aumento de la Emisión Acústica Total con la irradiación. Este efecto es más notable a bajas deformaciones, en las proximidades del límite elástico. En forma paralela las curvas de tracción exhiben el comportamiento usual, la tensión de fluencia aumenta con

la dosis de neutrones. Tampoco presentan cambios en el tipo de deformación, como ser la aparición de deformación plástica inhomogénea por propagación de bandas de Luders (este cambio podría producirse en el polí-cristal a mayores flujos integrados que los considerados).

La Fig. 3 representa rapidez de Emisión Acústica por unidad de deformación ($\frac{dA}{d\epsilon}$) vs. deformación (ϵ) para el material sin irradiar e irradiado ($\phi_t = 2,5 \times 10^{17}$). Claramente se observa que la Emisión Acústica comienza a deformaciones inferiores a la del límite elástico. Una vez alcanzado el mismo existe un pronunciado aumento de la actividad acústica por unidad de tiempo, más significativo a mayor valor del flujo total de irradiación.

La Fig. 4 es una micrografía óptica tomada en la parte central del grano, de una probeta irradiada, la comparación metalográfica con probetas sin irradiar a aproximadamente la misma deformación indica que a medida que aumenta la dosis de neutrones la distribución de bandas de deslizamiento cambia.

Discusión

El movimiento de dislocaciones es un mecanismo muy eficiente de disipación de energía mecánica, alrededor del noventa por ciento del trabajo realizado en deformar plásticamente un metal es convertido en calor principalmente y en ondas elásticas. A su vez la movilidad de las dislocaciones depende de la interacción con otras dislocaciones, impurezas, etc.; también en el caso que se está considerando con los defectos creados en la irradiación.

Las primeras observaciones con Microscopía Electrónica (6, 7), efectuadas en cobre irradiado con neutrones, indicaban la presencia de pequeños puntos negros ($< \sim 50 \text{Å}^2$) atribuidos a lazos de dislocación producidos por condensación de vacancias y o otros relativamente grandes ($> 80 \text{Å}^2$) de naturaleza intersticial. Esto fue confirmado en trabajos posteriores y en otros materiales (incluido Zircaloy). Makin y Colaboradores, (8) también con M.E. estudiaron la densidad de defectos en función de la dosis de neutrones en cobre, encontrando que el número de defectos de ambos tipos aumenta con la dosis y también el diámetro de los lazos de dislocación más grande.

Otros trabajos (9, 10) consideran que además de los anteriores existen otros defectos de irradiación: va-

cancias, intersticiales y las denominadas "zonas desnudas" o sea regiones desprovistas de átomos (exceso de lugares vacantes).

El endurecimiento por irradiación ocurre debido a la formación de dichas estructuras de defecto, las cuáles interactúan con las dislocaciones presentes en el material. Una línea de dislocación se ve temporalmente retenida por estas imperfecciones de la red (anclaje de la dislocación). En el caso de una aleación y a fines de simplificar el problema se puede hacer una división de los defectos de acuerdo a la intensidad de la interacción defecto-dislocación considerando como "obstáculos débiles" a átomos de impurezas (Al), vacancias e intersticiales y "obstáculos fuertes" a los lazos de dislocación de la foresta y las zonas desnudas. Bajo la acción de una tensión externa la dislocación se arquea produciéndose desanclaje primero de los obstáculos débiles y luego de los fuertes.

Para intentar explicar el comportamiento de la Emisión Acústica (E.A.) en el caso considerado, se debe efectuar una estimación del orden de magnitud del pulso de E.A. producido por el desanclaje de una línea de dislocación (Fig. 5). Dicha amplitud es proporcional (en el intervalo de frecuencias correspondientes: $\Delta\omega$) al voltage (V) generado en el cristal piezoeléctrico por la onda elástica incidente de amplitud $\sigma_{ij}(\Delta\omega)$

$$V = d \cdot e \cdot \sigma_{ij}(\Delta\omega) \cdot \kappa^2 / (1 + \kappa^2) \quad (1)$$

d = Cte. piezoeléctrica, e = espesor del cristal piezoeléctrico

K = coeficiente de acoplamiento: material-cristal piezoeléctrico

La tensión aplicada σ_a ejerce sobre la línea de dislocación una fuerza: $\sigma_{a,b}$ por unidad de longitud (b =vector de Burgers). Esta fuerza esta contrarrestada (considerando para este caso las contribuciones principales) por la acción de: tensiones internas (σ_i) del material (fuerza: $b \sigma_i$); fuerza resistiva de fricción, proporcional a la velocidad debida a la interacción de la dislocación con vibraciones térmicas de la red (fotones y a bajas temperaturas, electrones): $\partial D P / \partial t$; fuerza debido a la tensión de línea del segmento de dislocación curvado (11) $T \cdot D^2 P / D^2$; $T \propto G \cdot b^2$; G = módulo de corte.

Resulta como ecuación de movimiento:

$$T \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - B \frac{\partial P}{\partial t} + b \cdot G_e = 0 \quad (2)$$

$$G_e = G_a - G_i$$

La tensión efectiva (G_e) a bajas deformaciones se puede considerar aproximadamente constante (12).

La solución de (2) por separación de variables y desarrollo en serie para las condiciones (fig.5):

$$P(-\frac{L}{2}, t) = P(\frac{L}{2}, t) = 0 = P(z, 0) \quad L = \begin{cases} l \\ l' \end{cases}$$

$$P = \frac{4 \cdot G_e \cdot L^2 \cdot b}{\pi^2 \cdot T} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)^3} \cos \frac{(2k+1)\pi z}{L} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\pi^2 \cdot T \cdot (2k+1)^2 \cdot t}{L^2 \cdot B}} \right\} \quad (3)$$

El campo de deformación elástica producido por la onda acústica en un punto $P(x, y, z)$ (posición del cristal piezoeléctrico) situado a una distancia r es (13):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \approx \frac{1}{a^4} \cdot \frac{1}{r^3} \cdot x_i \frac{\partial(\gamma, z)}{\partial x_j} \cdot \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\partial P}{\partial t^2} \cdot dz \quad (4)$$

$$i, j = x, y, z \quad a = \sqrt{G/D}$$

D = densidad

De (3) y (4) se puede calcular el campo de tensiones de la onda elástica en $P(x, y, z)$ en un cierto intervalo de frecuencias (selectividad del sistema de detención) ($\Delta \omega \approx 100 \text{ KHZ}$), resulta:

$$G_{ij} \approx \frac{D \cdot b \cdot G_e}{a^2 \cdot B} \cdot L \cdot \Delta \omega \cdot \frac{x_i}{r^3} \cdot \frac{\partial(\gamma, z)}{\partial x_j} \quad (5)$$

En la expresión anterior es necesario tener en cuenta, además, la atenuación de las ondas elásticas al propagarse en el material, debido a absorción y dispersión. Esta es proporcional a $e^{-\alpha r}$ (α = coeficiente de atenuación, en la mayoría de los materiales este coeficiente es pequeño). Resulta:

$$\sigma_{ij} \approx \frac{D \cdot b \cdot G_e \cdot L \cdot \Delta \omega}{a^2 \cdot B} \cdot \frac{x_i e^{-\alpha r}}{r^3} \cdot \frac{\partial(\gamma \cdot z)}{\partial x_j} \quad (6)$$

La relación anterior establece que a medida que aumenta la dosis de irradiación disminuyen las amplitudes de las ondas elásticas generadas en los procesos de desanclaje (por disminución de L.). Por otra parte aumenta el número de puntos de anclaje (débiles y fuertes). La contribución a la E.A. total por desanclaje de dislocaciones será un balance entre estas dos tendencias.

Reemplazando en (6) valores típicos de los parámetros para metales FCC resultan amplitudes de pulso de E.A. pequeñas (Emisión Acústica "Tipo Continua") y es necesario para su detección el desanclaje simultáneo de al menos 10^6 - 10^7 segmentos de "obstáculos fuertes" o de 10^9 - 10^{10} "de obstáculos débiles". A su vez, si la longitud total de la línea de dislocación es: 10^9 /cm² (característica del material policristalino) y la longitud media de los segmentos en condiciones de moverse es: 10^{-5} cm (para "obstáculos fuertes. Resulta: 10^{14} puntos de anclaje por cm³ ($\sim 10^{16}$) para "obstáculos débiles").

Estos valores deben aumentar con la dosis de irradiación de acuerdo a los resultados de Microscopía Electrónica. Debido al elevado número de procesos involucrados en cada pulso de E.A., el mecanismo de desanclaje solo podría dar cuenta en forma parcial del comportamiento observado de la E.A. con la dosis de irradiación.

Otra posible contribución, resulta de considerar que debido al aumento de la tensión de fluencia en las probetas irradiadas, dislocaciones ubicadas en granos favorablemente orientados respecto a la dirección de tracción, adquieren suficiente energía como para provocar desanclajes sucesivos de otras dislocaciones ubicadas en el mismo plano de deslizamiento o en planos vecinos, de este modo se pueden formar grupos de dislocaciones en movimiento uniforme; los cuales pueden dar origen (14) a pulsos de E.A. elevados (Emisión Acústica, "tipo pulso").

Referencias

- 1.- D. Harris - L. Dunegan: Non Destruc. Testing: 1974, 137-
- 2.- Jersey Nuclear Co.: "An Aproach to Pre-Service and In-Service Inspection of Nuclear Reactors using A.E. Analysis: Report 1971.-
- 3.- D. Ireland et al: In Service Program for Nuclear Reactor Vessels: Rep.4 (1970), Rep. 6 (1972).
- 4.- I. Palmer: Mater. Sci. Eng. :1973,11,227.
- 5.- P. Hutton - L. Parry: Mater. Res. Standard: 1971,11,25.
- 6.- R. Coterrill: Appl. Phys. Letters: 1966,9,29.
- 7.- K. Merkle: Argonne Nat. Lab. Rep. : 1963,375
- 8.- M. Makin - D. Whapham.F.Minter: Phil. Mag.: 1962,285.
- 9.- J. Brinkman: Amer. I. Phys. 1956, 246.
- 10- A. Seeger: Proceed. 2nd. Inter. conf. Peaceful Uses of A. Energy: 1958,250.
- 11- De Wit - I. Koheler: Phys Review: 1959.1113.
- 12- I. Li - R. Vensamer: Mat. Sci. Eng.: 1969,620.
- 13- A. Ookawa - K. Yazu: Proceed. Inter. Conf. On Crystal Lattice Defects, Jâpan: 1962,36
- 14- A publicarse.

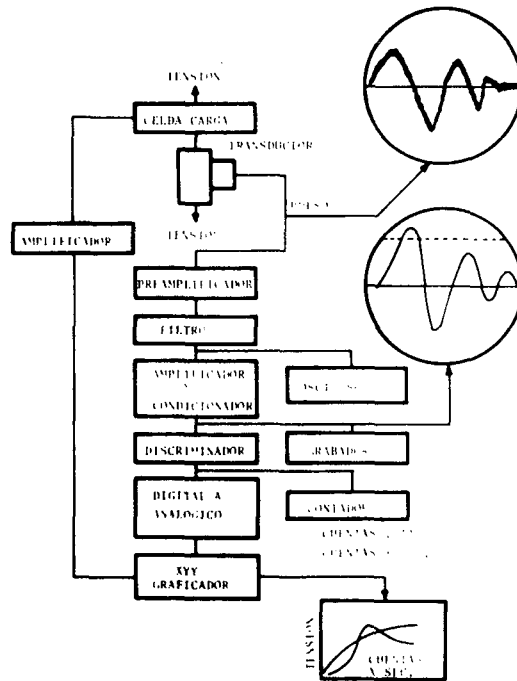


Fig. 1

Diagrama esquemático del equipo de Emisión Acústica.

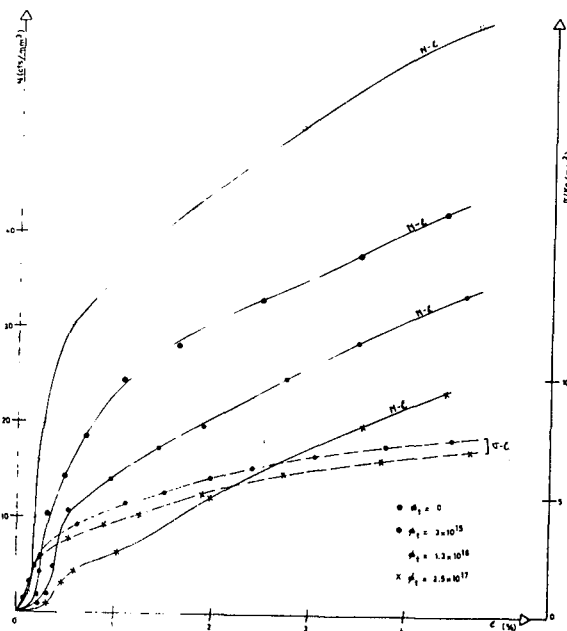


Fig. 2

Dependencia con la dosis de irradiación (ϕ_t) del número de pulsos de E.A. acumulados (N) y de la tensión aplicada (σ) en función de la deformación (ϵ).

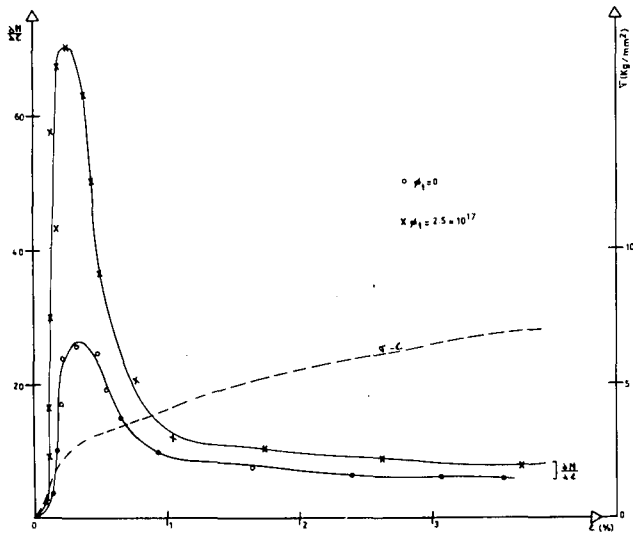


Fig. 3

Curvas tensión-deformación y rapidez de emisión acústica ($\frac{\Delta N}{\Delta \epsilon}$)-deformación (ϵ) para dos valores del flujo total de irradiación (ϕ_L).

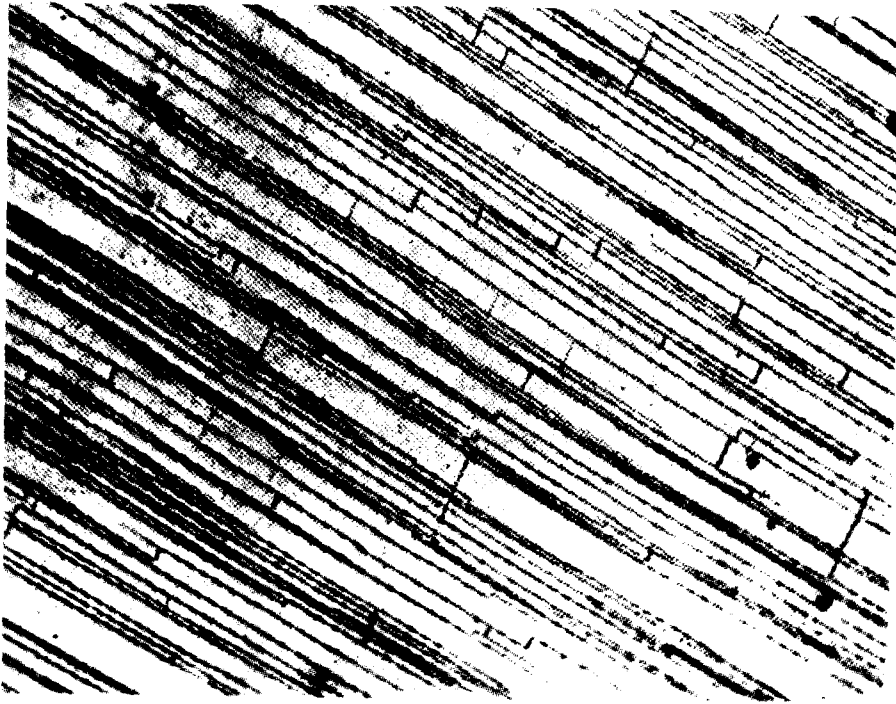


Fig. 4

Bandas de deslizamiento en Cu-1Al irradiado ($\phi_L = 2.5 \times 10^{17}$).

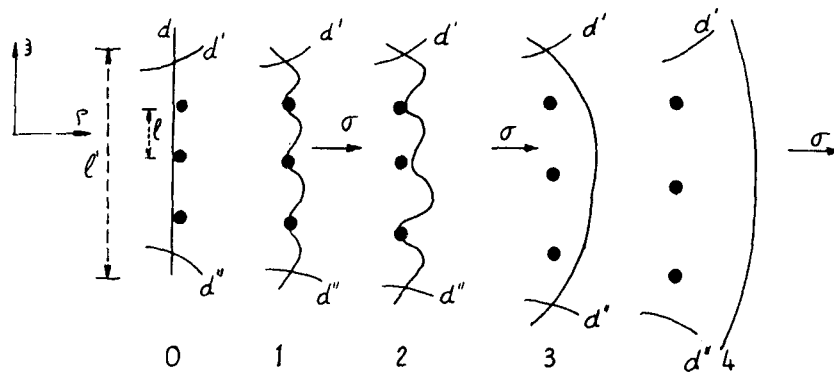


Fig. 5

Proceso de desanclaje de una dislocación