

# Evolución de Tensiones Residuales en Chapa de Zircaloy-2

J.W. SIGNORELLI, P.A. TURNER Y R.A. LEBENSOHN

INSTITUTO DE FÍSICA ROSARIO (UNR-CONICET) - FAC. DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA (UNR)  
27 DE FEBRERO 210 BIS - (2000) ROSARIO - ARGENTINA  
e-mail: pablo@ifir.edu.ar

La predicción e interpretación del efecto de las tensiones residuales en Zircaloy-2 con textura de chapa requiere del uso de modelos policristalinos que tomen en cuenta la alta anisotropía de este material. En el presente trabajo se utilizan dos modelos policristalinos autoconsistentes, para los regímenes elastoplástico y viscoplástico, respectivamente, que permiten simular tanto la evolución de textura por laminado como la transición elastoplástica. Los resultados indican que, si bien las tensiones residuales de origen láminico presentes en el material debido al enfriado previo se manifiestan en la tensión de fluencia al 0.2%, su efecto es prácticamente despreciable cuando se alcanzan deformaciones verdaderas del 2%.

## Introducción

Zircaloy-2 es una aleación de zirconio de importancia en la industria nuclear, en particular dicha aleación se utiliza para fabricar los tubos de calandria de reactores nucleares tipo CanDU®. Debido a la fuerte anisotropía térmica, elástica y plástica, los policristales de aleaciones de zirconio, presentan tensiones internas cuando son sometidos a trabajado termo-mecánico<sup>1</sup>.

Los modelos que permiten el cálculo de las propiedades mecánicas de policristales, tomando en cuenta en forma explícita la textura cristalográfica del espécimen han tenido un importante desarrollo en años recientes. En el caso de materiales altamente anisotrópicos resulta necesario utilizar formulaciones autoconsistentes que permiten a cada grano deformar diferente respecto del policristal, de acuerdo con sus propiedades direccionales<sup>2</sup>. En el presente trabajo se utilizan dichos modelos autoconsistentes para los regímenes elastoplástico (EPSC)<sup>3</sup> y viscoplástico (VPSC)<sup>4</sup>.

## Modelos

Bajo una formulación autoconsistente, cada grano es considerado como una inclusión que deforma en el seno de un medio homogéneo que posee las propiedades promedio del policristal. La esencia de dichos modelos consiste en obtener una ecuación de interacción (EI) que vincule los desvíos en tensión y deformación entre el grano y el policristal. A partir de la ecuación de interacción y las ecuaciones constitutivas (EC) del grano y del policristal es

posible derivar una ecuación autoconsistente (EA) que permite calcular en forma iterativa los estados de tensión-deformación locales y macroscópico.

En el caso elastoplástico se tiene:

$$\text{EC grano: } \dot{\sigma} = \mathbf{L}^g \dot{\epsilon} \quad (1)$$

$$\text{EC policristal: } \dot{\Sigma} = \mathbf{L} \dot{E} \quad (2)$$

donde  $\mathbf{L}^g$  y  $\mathbf{L}$  son los módulos elastoplásticos incrementales<sup>5</sup> del grano y del policristal, respectivamente,  $(\dot{\sigma}, \dot{\epsilon})$  y  $(\dot{\Sigma}, \dot{E})$  son el estado velocidad de tensión-deformación del grano y del policristal. La ecuación de interacción (EI) que resulta en este régimen es:

$$\text{EI: } \dot{\sigma} - \dot{\Sigma} = -\tilde{\mathbf{L}}(\dot{\epsilon} - \dot{E}) \quad (3)$$

la cual relaciona el desvío en velocidad de tensión  $\dot{\sigma} - \dot{\Sigma}$  con el desvío en velocidad de deformación  $\dot{\epsilon} - \dot{E}$  a través del tensor de interacción  $\tilde{\mathbf{L}}$ , el cual se define en función del módulo elastoplástico del policristal y del tensor de Eshelby  $\mathbf{S}$ , según la relación:

$$\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{L}(\mathbf{S}^{-1} - \mathbf{I}) \quad (4)$$

La ecuación autoconsistente resulta de reemplazar las ecuaciones constitutivas (1) y (2) en la ecuación de interacción (3), aplicando luego la condición de que el promedio (pesado por la textura) de las velocidades de tensión (o deformación) en los granos sea igual a la velocidad de tensión (o deformación) en el policristal:

$$\text{EA: } \mathbf{L} = \langle \mathbf{L}^g \mathbf{A}^g \rangle \quad (5)$$

$$\text{donde } \mathbf{A}^g = (\mathbf{L}^g + \tilde{\mathbf{L}})^{-1} (\mathbf{L} + \tilde{\mathbf{L}}) \quad (6)$$

es tensor de localización en tensión.

En el regimen viscoplástico las ecuaciones constitutivas del grano y del agregado policristalino son:

$$\text{EC grano: } \dot{\epsilon} = \mathbf{M}^g \sigma' \quad (7)$$

$$\text{EC policristal: } \dot{\mathbf{E}} = \mathbf{M} \Sigma' \quad (8)$$

resultando una ecuación de interacción de la forma:

$$\text{EI: } (\dot{\epsilon} - \dot{\mathbf{E}}) = -\tilde{\mathbf{M}} (\sigma' - \Sigma) \quad (9)$$

donde el tensor de interacción  $\tilde{\mathbf{M}}$  se define según la expresión:

$$\tilde{\mathbf{M}} = n(\mathbf{I} - \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S} \mathbf{M} \quad (10)$$

la cual toma en cuenta, a través del coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación:  $n$ , la no linealidad del regimen viscoplástico. En este caso la ecuación autoconsistente y el tensor de localización en deformación  $\mathbf{B}^g$  poseen las siguientes expresiones:

$$\text{EA: } \mathbf{M} = \langle \mathbf{M}^g \mathbf{B}^g \rangle \quad (11)$$

$$\text{donde } \mathbf{B}^g = (\mathbf{M}^g + \tilde{\mathbf{M}})^{-1} (\mathbf{M} + \tilde{\mathbf{M}}) \quad (12)$$

Las formulaciones elastoplástica y viscoplástica brevemente descritas en los párrafos anteriores han sido implementadas numéricamente en los códigos EPSC y VPSC respectivamente.

### Aplicación y Resultados

A fin de estudiar la influencia de la textura en la respuesta termomecánica del policristal, inicialmente se han simulado, con el código

EPSC, una serie de ensayos mecánicos tipo "channel-die" hasta un 3% de deformación en chapas que presentan diferentes texturas. Se simuló además un proceso de enfriamiento con el objeto de generar tensiones residuales de origen térmico. Las diferentes texturas se obtuvieron teóricamente con el código VPSC por simulación de procesos de laminación hasta diferentes porcentajes de deformación final de una chapa que inicialmente no presentaba textura (distribución uniforme de orientaciones). Las figuras de polos basales para las distintas texturas resultantes se muestran en la Fig.1. Las simulaciones de desarrollo de textura muestran que a medida que se aumenta el porcentaje de laminación se produce una concentración de intensidad en plano Normal-Transversal (ND-TD) y a un ángulo de aproximadamente 30° en este plano. Para porcentajes mayores que el 80% de laminación se produce un desplazamiento del máximo hasta alcanzar un valor de aproximadamente 55° para un 200% de laminación.

En la Fig.2 se presentan las curvas de carga en los 5 agregados policristalinos obtenidos por simulación. De la comparación entre estas curvas surge que una textura más pronunciada (chapa laminada al 200%) induce un ablandamiento en la curva de carga. La diferencia de tensiones de pico al 3% de deformación entre un policristal sin textura (distribución uniforme) y uno con textura correspondiente al 200% de laminación alcanza 100 MPa . La tensión transversal al 3% de deformación presenta igualmente una

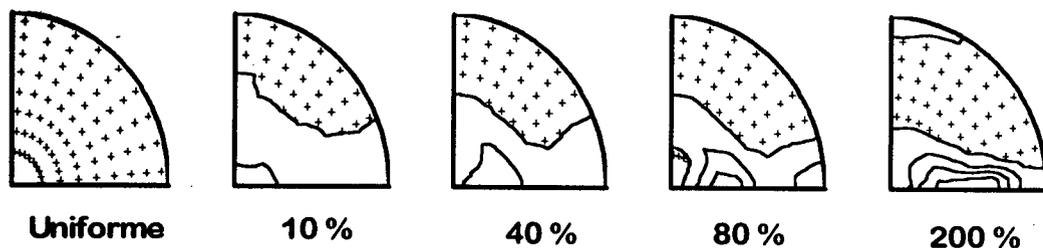


Figura 1. Figuras de polos basales (0002) de las texturas obtenidas por simulación de laminado, a diferentes porcentajes de deformación verdadera, con el modelo viscoplástico (VPSC)

relajación de la tensión al aumentar el trabajado previo de laminación.

Debido a la baja anisotropía elástica del Zircaloy-2 no se observan diferencias en la respuesta puramente elástica. La pendiente al inicio de la transición elastoplástica, está relacionada con la cantidad de granos favorablemente orientados para deformar por maclado de tracción. El desarrollo en los granos

de tensiones suficientes para activar modos de deformación más duros como maclado de compresión y deslizamiento piramidal  $\langle c+a \rangle$  produce un nuevo cambio en la pendiente de la curva, comprendido entre un 0.8% y 1.2% de deformación. A partir de deformaciones superiores comienza una gradual participación del deslizamiento piramidal (véase Fig.3).

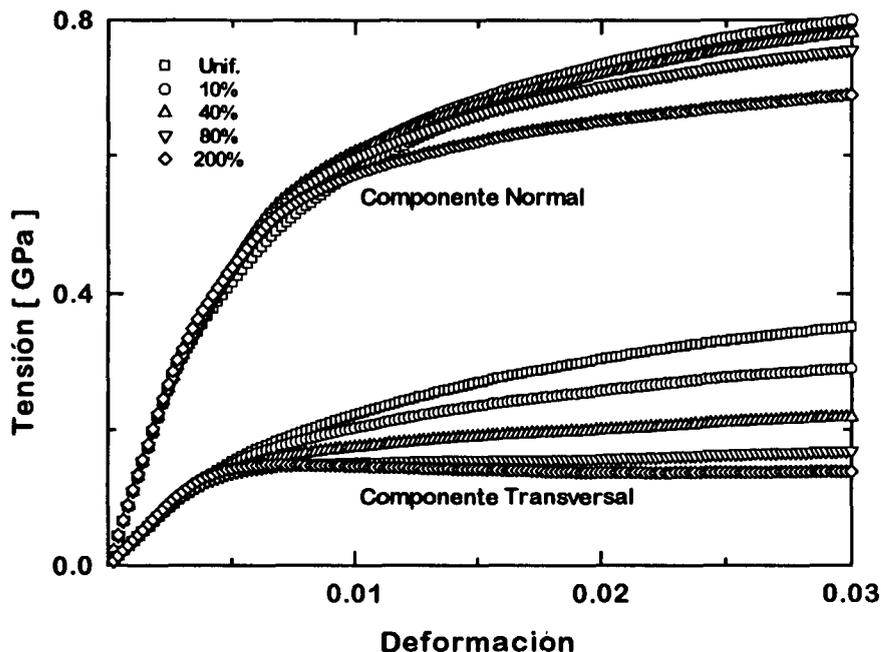


Figura 2. Curvas de carga al 3% de deformación por laminado para las diferentes texturas representadas en la Fig.1

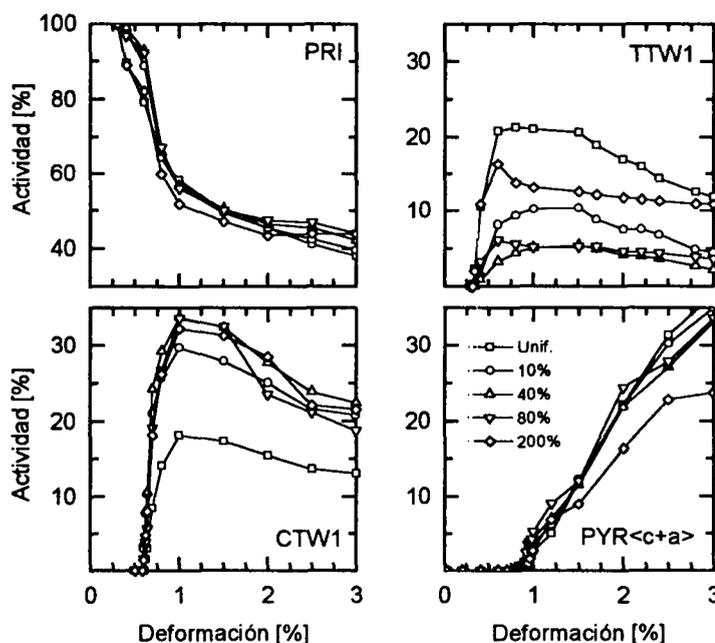


Figura 3. Actividad relativa de los modos de deslizamiento prismático (PRI) y piramidal  $\langle c+a \rangle$  (PYR  $\langle c+a \rangle$ ) y de los modos de maclado de tracción (TTW1) y de compresión (CTW1) durante un laminado al 3%.

Las simulaciones de los ensayos de carga tipo "channel-die" se repitieron sobre las diferentes texturas pero tomando en cuenta el estado previo del material debido a un enfriado desde 898 °K a 298 °K, el cual induce el desarrollo de tensiones residuales de origen térmico. Los resultados obtenidos indican que la presencia de dichas tensiones anticipan la actividad de los modos de deslizamiento prismático y del maclado de tracción (Fig.3), produciendo una disminución en la tensión de fluencia (definida al 0.2% de deformación plástica) de entre 35-60 MPa (Fig.4).

La tensión de pico al 2% muestra que el efecto de las tensiones internas de origen térmico ha dejado de influir para el caso de textura uniforme pero su efecto aumenta para policristales con texturas de 10%, 40%, 80% y 200%, alcanzando sobre este último una diferencia de 15 MPa.

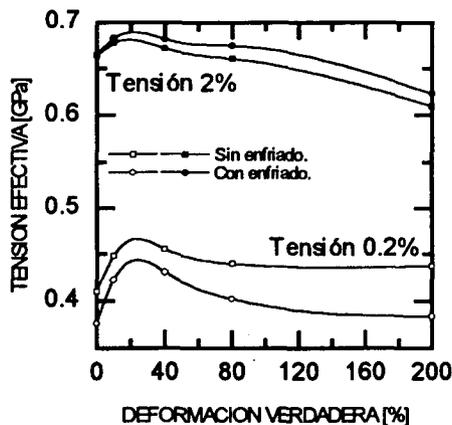


Figura 4. Tensión de fluencia para chapa laminada a diferentes porcentajes. Influencia del tratamiento térmico

Las propiedades térmicas del Zircaloy-2 son fuertemente anisotrópicas. Los coeficientes térmicos en el cristal simple son de  $11.4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  en la dirección <c> y de  $5.7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  en la dirección <a>. Un tratamiento de enfriado en un policristal introducirá deformaciones residuales en los granos con el objeto de mantener la compatibilidad. Los planos basales presentan un estado de tracción, mientras los planos prismáticos se encuentran bajo compresión (Fig.5). Las deformaciones elásticas necesarias para mantener la compatibilidad son de  $+7 \times 10^{-4}$

y  $-4 \times 10^{-4}$  respectivamente en un material sin texturar. La anisotropía introducida al trabajar por laminado el policristal con textura uniforme hace que la compresión elástica no sea igual en todos los planos prismáticos (Fig.5). En general, nuestros resultados indican que el efecto introducido por las tensiones residuales de origen térmico sobre las tensiones internas durante el ensayo no son de relevancia al cabo de un 2% de deformación. Tal como se ha mostrado, la introducción de tensiones térmicas origina un estado de tracción en la dirección <c> y de compresión en la dirección <a>, retardando la aparición del maclado de compresión, lo cual implica una deformación adicional de 0.1-0.15% equivalente a un aumento de 50 MPa en la tensión normal aplicada.

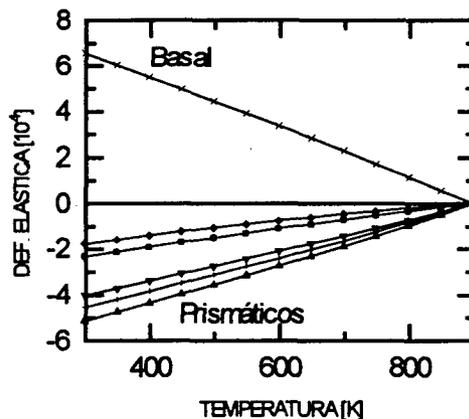


Figura 5. Deformación residual de origen térmico para un grano orientado ND-TD 55° en chapa de Zircaloy-2 laminado al 200%.

### Referencias

- 1- MacEwen, S.R., Tomé, C.N. y Faber Jr, J., Acta metall. 37 (1989) 979.
- 2- Hill, R., J. Mech. Phys. Solids 13 (1965) 89.
- 3- Turner, P.A. y Tomé, C.N., Acta metall. 42 (1994) 4143.
- 4- Lebensohn, R.A. y Tomé, C.N., Mater. Sci. Engng. A175 (1994) 71.
- 5- Hutchison, J.W. Proc. Roy. Soc. Lond. A319 (1970) 247.