

PREDICCIÓN CUANTITATIVA DE LA POSICIÓN Y ALTURA DE OREJAS DE EMBUTIDO PROFUNDO EN CHAPAS DE ALUMINIO

A.Pochettino (Departamento de Materiales, CNEA)

M.Pernot, R.Penelle (Laboratoire de Metallurgique Physique, Univ. Paris-Sud, Francia)

RESUMEN: Se han calculado los perfiles de copa de embutido correspondientes a diferentes estados metalúrgicos de aleaciones de Al, con la hipótesis de que la formación de orejas se produce bajo el prensa-chapas, bajo un estado de tensiones planas. La curva límite criterio plástico (yield locus) es calculada utilizando el modelo de Taylor. La anisotropía es introducida por la Función distribución de orientaciones cristalinas. Se encuentra un buen acuerdo entre los valores calculados y los resultados experimentales, tanto para los perfiles de embutido, como para su evolución en función de la deformación por laminado.

Quantitative Prediction of the Position and Height of Deep-Drawing Ears in Aluminium Sheets.

SUMMARY: The cup profiles of different metallurgical states of aluminium alloys have been computed, assuming that ear formation takes place under the blank-holder, in plane stresses. The yield locus is calculated using the Taylor model. The anisotropy is introduced by means of the Crystalline Orientation Distribution Function.

A good agreement between predicted and experimental results can be noted for cup profiles and their evolution in rolling strain.

INTRODUCCION

La existencia de "orejas" o "cuernos de embutido" es consecuencia de la anisotropía de la deformación plástica, debida esencialmente a la textura cristalográfica. Industrialmente, es importante predecir la formación de orejas de embutido, a fin de eliminarlas y de obtener productos de embutido lo más profundos posibles sin fracturas.

Para casos muy simples (4 orejas), el coeficiente de Lankford - $R(\alpha) = (\delta E_{22} / \delta E_{33})$, medido en un ensayo de tracción simple, puede ser utilizado en la predicción de orejas de embutido. Cuando el valor de $R(\alpha)$ es máximo, δE_{33} es pequeño y una oreja puede ser asociada. Para estos casos es también posible predecir la altura relativa de las orejas ya que

$$AR = \frac{1}{2} \{ R(0^\circ) + R(90^\circ) - 2R(45^\circ) \}$$

es proporcional al porcentaje de orejas

$$AH = 2(H_{\max} - H_{\min}) / (H_{\max} + H_{\min})$$

donde H corresponde a las alturas de pared en el producto final (1).

En chapas de aluminio tipo 1100 (pureza comercial), el cálculo de R ha permitido realizar la predicción de sistemas de 4 cuernos ubicados a 0° y 90° o a 45° de la DL, inclusive de un estado sin formación de orejas (2).

Estos estados fueron correlacionados con la evolución de la textura cristalográfica como función de los tratamientos metalúrgicos. En cambio, el parámetro R (α) no permite una predicción de estructuras complejas de 6 u 8 orejas como las que se observan en una aleación Al - 2% Mg, tipo 5052, para diferentes estados metalúrgicos. Este hecho se puede explicar por el hecho de que R (α) es determinado en tensión uniaxial, mientras que el metal es formado bajo estados de tensiones complejos. Si se desea determinar el perfil de orejas de embutido, es necesario determinar la evolución de tensiones y deformaciones durante el proceso de formado.

Por lo tanto, es necesario realizar una modelización del embutido profundo y del comportamiento plástico del policristal.

CALCULO DE PERFILES DE COPA.

ENSAYO DE EMBUTIDO PROFUNDO - MODELIZACION

El análisis de resultados experimentales permite aceptar en primera aproximación las siguientes hipótesis:

- Las orejas se forman bajo el prensa-chapas.
- Las deformaciones en la pared y en el fondo de la copa son despreciables.
- Los estados de tensiones bajo el prensa-chapas pueden asociarse a un estado de tensiones planas. Cada radio es un eje principal de tensiones y deformaciones.

- A cada instante, el sistema tiene un comportamiento estático.

Luego en coordenadas cilíndricas, el sistema de ecuaciones a resolver es el siguiente:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{(\sigma_{rr} - \sigma_{\alpha\alpha})}{r} = 0 \quad (1)$$

$$F(\sigma_{rr}, \sigma_{\alpha\alpha}) = 0$$

con la condición límite $\sigma_{rr} = 0$ para $r = RE(E)$, donde $RE(E)$ es el radio exterior del disco de material a embutir.

En el sistema (1), $F(\sigma_{ij}) = 0$ es el Yield Locus en tensiones planas, el cual, en este trabajo, es calculado teniendo en cuenta los mecanismos de deformación y la anisotropía cristalográfica.

COMPORTAMIENTO DE UN POLICRISTAL BAJO TENSIONES PLANAS.

El llamado modelo de Taylor fue utilizado para describir el comportamiento de un policristal bajo tensiones planas.

Para un grano de orientación $g(\psi, \theta, \chi)$ sometida a una dada deformación ϵ_{ij} , se puede determinar el correspondiente factor de Taylor $M(\epsilon_{ij}, g)$. El mismo es proporcional al trabajo de deformación y es calculado por la maximización del trabajo en función de las tensiones, de acuerdo al método de Bishop y Hill (3).

Para una chapa policristalina texturada, el valor promedio del Fac

tor de Taylor se puede escribir (4):

$$M(\epsilon_{ij}, \alpha) = \int M(\epsilon_{ij}, g, \alpha) \cdot F(g) dg \quad (2)$$

donde $F(g)$ es la función distribución de orientaciones cristalinas, la que permite describir cuantitativamente las texturas.

Para tensiones planas (σ_{rr} , $\sigma_{\alpha\alpha}$) y estados de deformaciones (∂E_{rr} , $\partial E_{\alpha\alpha}$, ∂E_{zz}), el trabajo de deformación se escribe.

$$\partial W(q, \alpha) = \sigma_{rr} \partial E_{rr} + \sigma_{\alpha\alpha} \partial E_{\alpha\alpha}$$

si definimos un "factor de contracción" $q = - \partial E_{\alpha\alpha} / \partial E_{rr}$

$$\frac{\partial W(q, \alpha)}{\tau_c \partial E_{rr}} = \frac{\sigma_{rr} - q \sigma_{\alpha\alpha}}{\tau_c} = M(q, \alpha)$$

donde τ_c es la tensión crítica resuelta para deslizamiento cristalográfico $\{111\} \langle 110 \rangle$. $M(q, \alpha)$ puede ser calculado para cada valor de q (5). Luego, a los estados de tensiones les corresponde una ecuación lineal.

$$\sigma_{rr} - q \sigma_{\alpha\alpha} = \tau_c M(q, \alpha) \quad (3)$$

con una pendiente $\text{tg } \theta = 1/q$. Como consecuencia de la regla de normalidad derivada del principio de trabajo máximo, el Yield Locus es el envoltorio de la familia de rectas dada por (3) con $-\infty < q < \infty$. Un programa de cálculo de la frontera plástica fue escrito (6). En la fig. (1) se muestra el resultado obtenido para una chapa de Al 5052 laminado, pudiéndose observar la dependencia del Yield Locus con el ángulo α que forma la dirección radial con la de laminado. Para el embutido profundo, el perfil de copa es determinado por la forma del Yield Locus en el cuadrante de tensión - compresión (4to. cuadrante)

Un programa de cálculo ha sido escrito (6) a fin de resolver el sistema de ecuaciones (1). El mismo se basa en el cálculo iterativo de tensiones y deformaciones existentes instante a instante en una

grilla definida sobre el material a deformar.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se estudió la evolución de orejas de embutido en aleaciones de Al - 2%Mg (tipo 5052) sometidas a diferentes tratamientos termomecánicos, las cuales pueden exhibir 4,6 u 8 orejas.

TEXTURAS CRISTALOGRAFICAS

Las figuras de polos con espesor inferior o igual a 2 mm. fueron determinadas por difracción de Rayos X, utilizando el método de transmisión - reflexión con radiación $K\alpha$ de molibdeno (5). Para muestras cuyo espesor superan los 2 mm., fue utilizada la difracción de neutrones (7). La función distribución de orientaciones cristalinas fue calculada al orden $l=16$, lo que corresponde a una precisión superior al 15% para todas las muestras.

Pueden observarse tres componentes principales de texturas para los diferentes estados:

- Una componente cúbica $\{100\} \langle 001 \rangle$
- Una segunda componente alrededor de $\{123\} \langle 111 \rangle$
- Una componente $\{110\} \langle 001 \rangle$

La evolución de los máximos de la FDOC asociados a dichas componentes puede ser observada en las figuras.

(2-1). Para un material laminado en frío a partir de una chapa de 8mm de espesor sometida a un tratamiento térmico de 1h. a 350°C. (indicado con 4R).

(2-b). Para Al 5052 laminado a partir de la chapa de 8 mm. y sometido a un tratamiento térmico de 1h. a 350°C (4ERF).

La evolución de dichas figuras permite solamente tener una idea de la evolución de los máximos de la FDOC, ya que la dispersión alrededor de esos máximos y la evolución de la misma no está representada. Sin embargo, se pone de manifiesto que la componente cercana a $\{123\} \langle 111 \rangle$ es dominante en los estados R, mientras que la componente cúbica $\{100\} \langle 001 \rangle$ es dominante para los estados ERF. En ambos casos se puede observar la tendencia a la saturación de las componentes principales cuando el porcentaje de laminado se incrementa.

PERFILES DE EMBUTIDO

En la figura (3) se puede observar un perfil de embutido para una muestra de Al 5052 ERFO, 5mm. de espesor. En dicha figura 4R representa la altura relativa (en mm.) de la pared del producto embutido, siendo H_m el valor medio de dicho perfil.

La curva calculada está emplazada dentro de la banda rayada que corresponde a la dispersión de las medidas experimentales. La curva calculada presenta 3 máximos situados a 0° , $\approx 45^\circ$ y 90° de la dirección de laminado, con lo cual se predice la estructura con 8 orejas de embutido.

La evolución de las orejas de embutido fue estudiada en función de reducción por laminado para las 2 series de tratamientos. En las fig. (4) y (5) se representan los porcentajes de orejas de embutido medidos y calculados. Dicho porcentaje se define.

$$\Delta H (\alpha) = \frac{H(\alpha) - H_{min}}{\bar{H}}$$

donde $H(\alpha)$, H_{min} y \bar{H} representan la altura de la pared para α grados, la altura mínima y el valor medio de la misma.

CONCLUSIONES

La predicción del perfil y del porcentaje de orejas de embutido para los diferentes estados metalúrgicos está en buen acuerdo con las evoluciones observadas experimentalmente.

Para una mayor exactitud en las predicciones se necesita una modelización más realista que tenga en cuenta:

- Las fuerzas de fricción, de doblado y la rotación de los ejes principales de tensiones durante el proceso de embutido profundo.
- La evolución de la textura con la deformación y el endurecimiento anisotrópico.

REFERENCIAS.

1. J. GREWEN, Textures and deep drawing process. Proceedings of the International Seminar, Craxow, September 1-6, 1971. p.p. 195-218.
2. O. FERREIRA, P. DERVIN, M. PERNOT y R. PENELLE, Textures of materials, G. GOTTSTEIN Y K. LUCKE Ed., Springer Verlag, 1978, p.p. 337, 346.
3. J.F. BISHOP, Phil. Mag., 44 (1953), 51.
4. W.F. HOSFORD Y W.A. BACKOFEN, Proc. of the 9th. Sagamore Conference, Syracuse Univ. Press. 1964, p.p. 259-292.
5. M. PERNOT, These d'Etat Univ. Paris XI, Orsay, 1978.
6. A. POCHETTINO, These Docteur Ingenieur, Univ. Paris XI, Orsay, 1981
7. M. MARDON, M. PERNOT, P. DEWIN, R. PENELLE Y M. ENGLANDER, J. Appl. Cryst, 10 (1977), 372.

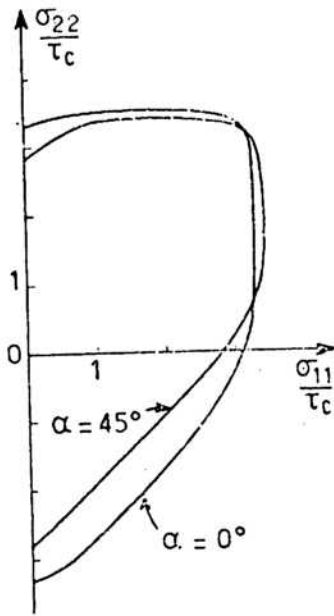


FIG. 1: Yield Locus para Al 5052 serie 4R. La forma de la curva depende del ángulo que forma la dirección radial con DL.

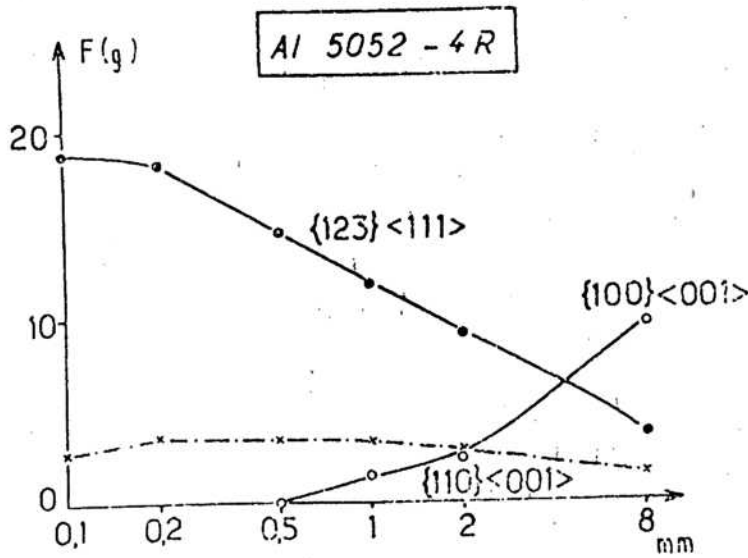


FIG. 2-a

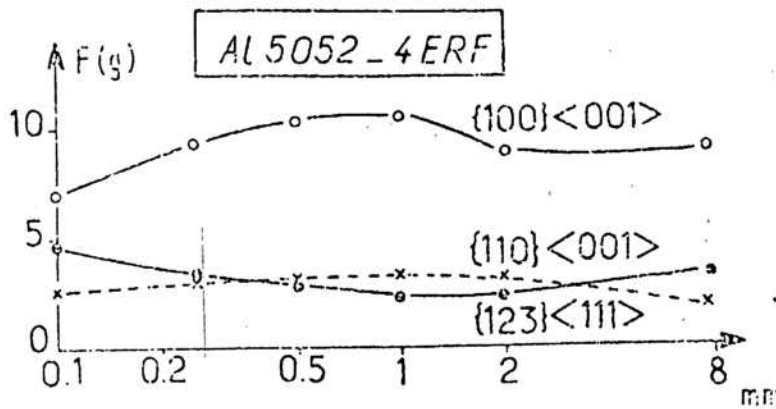


FIG. 2-b

FIG.2a-b: Evolución de las principales componentes de la textura de chapas de Al 5052 en función de la reducción por laminado.

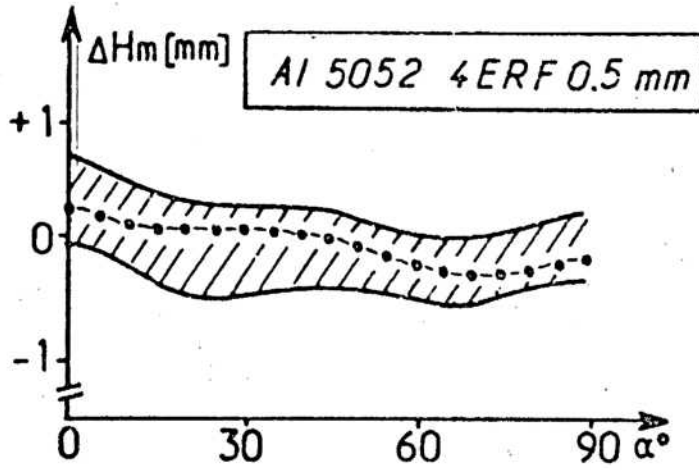


Fig. 3: Perfil de copa calculado (puntos) y determinado experimentalmente (zona rayada) para Al 5052.

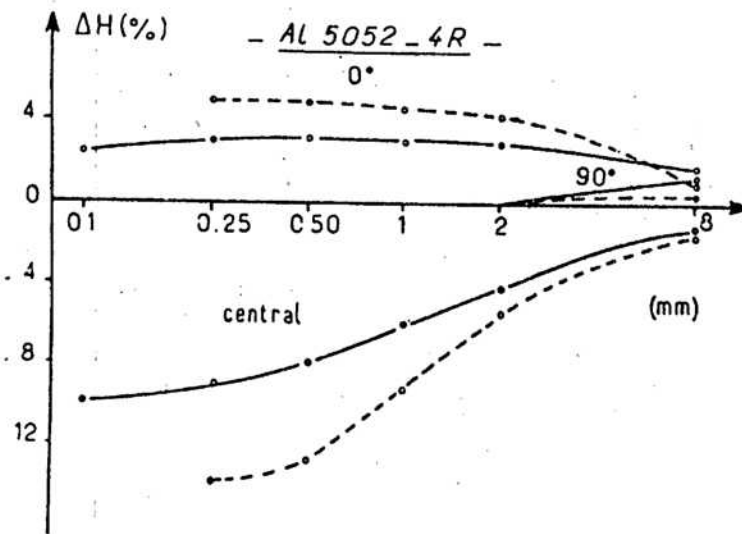


FIG.4

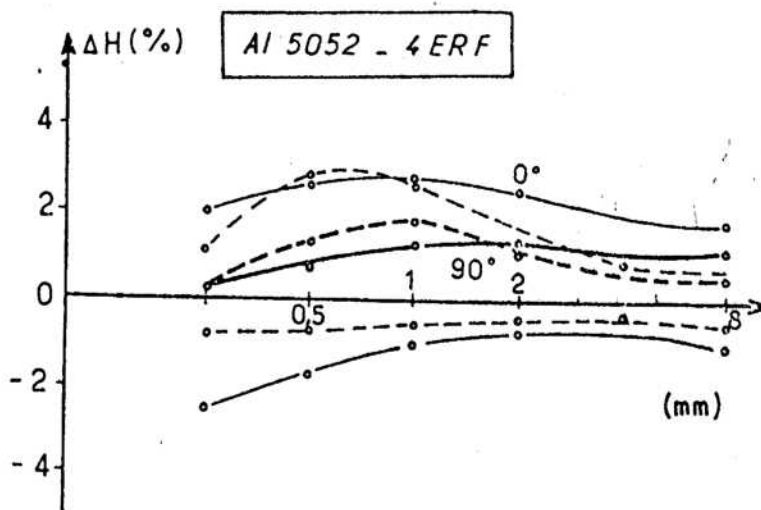


FIG.5

FIG: 4-5: Evolución del porcentaje de orejas de embutido en función del espesor de la chapa. Valores experimentales (línea de trazos). Valores calculados (línea llena).