

04.72.08

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| C.N.E.A. Biblioteca   |            |
| ARCHIVO PUBLICACIONES |            |
| NO<br>1               | NO<br>1972 |

TE 19/86

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

GERENCIA DE TECNOLOGIA

EFFECTO DE MEMORIA MECANICA EN ALEACIONES DE Cu-Zn-Si

AMADO CABO Y HORACE POPS

Presentado a las V JORNADAS METALURGICAS de la S.A.M., setiembre de 1972

BUENOS AIRES

- 1972 -

TE 19/86

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

GERENCIA DE TECNOLOGIA

EFECTO DE MEMORIA MECANICA EN ALEACIONES DE Cu-Zn-Si

AMADO CABO Y HORACE POPS

Presentado a las V JORNADAS METALURGICAS de la S.A.M. , setiembre de 1972

BUENOS AIRES

- 1972 -

## EFECTO DE MEMORIA MECANICA EN ALEACIONES DE Cu-Zn-Si

Amado Cabo\* y Horace Pops\*\*

En trabajos anteriores se ha observado que algunas aleaciones deformadas por debajo de cierta temperatura, pueden recuperar parte de la deformación plástica cuando se calientan a una temperatura mayor que la de deformación. Este fenómeno ha sido denominado "efecto de memoria mecánica" y fue estudiado principalmente en aleaciones de Ni-Ti (1), U-Nb (2), In-Tl (3), Cu-Al-Ni (4) y Au-Cd (5). En las aleaciones estudiadas el efecto de memoria mecánica aparece íntimamente ligado a transformaciones de fase de tipo martensítico.

En el presente trabajo se observó efecto de memoria mecánica en aleaciones de Cu-Zn-Si en fase  $\beta$ , y fue estudiado mediante ensayos de doblado en chapas y ensayos de compresión en probetas cilíndricas. Dichas aleaciones en equilibrio están constituidas por dos fase  $\alpha + \beta$ , pero es posible retener por templado una fase  $\beta$  de estructura bcc que transforma martensíticamente en forma espontánea a cierta temperatura; la fase martensítica también puede inducirse a temperatura constante aplicando tensiones mecánicas.

La preparación de las aleaciones se realizó con materiales de una pureza de 99,99%, se preparó una aleación patrón de Cu-Si y luego se obtuvo la composición adecuada por el agregado de Zn. La fusión se realizó en crisol de grafito usando un horno de inducción de 10 Kw y los lingotes resultantes fueron de 2 kg, aproximadamente.

Los lingotes fueron homogeneizados durante 24 horas a 800°C y luego laminados en caliente y en frío para obtener barras y chapas. El templado final para retener la fase  $\beta$  se realizó en agua desde 850°C y, mediante análisis químico, se observó en el producto final una composición de 61,1% de Cu, 38,5% de Zn y 0,4% de Si en peso.

Con el objeto de caracterizar las aleaciones, se midió, en función de la temperatura, el cambio de resistividad eléctrica; esta técnica permite determinar las temperaturas características asociadas a la transformación martensítica. La Fig. 1 muestra una curva típica del cambio de resistividad en función de la temperatura, en la que se muestra durante el enfriamiento, la temperatura  $M_s$  en que comienza la formación de martensita y la temperatura  $M_f$  en que finaliza. Se muestra también la temperatura  $A_s$  en que la martensita comienza a revertir a la fase  $\beta$  durante el calentamiento, y la temperatura  $A_f$

---

\* Comisión Nacional de Energía Atómica, Gerencia de Tecnología.

\*\* Essex International Inc., Fort Wayne, Indiana, EE.UU.

en que finaliza.

Los ensayos de doblado de chapas en fase  $\beta$  se hicieron usando probetas de 0,35 mm de espesor y 12 mm de ancho; las probetas fueron dobladas a  $180^\circ$  sobre dados de radio variable para obtener deformaciones aproximadamente de 4%, 6% y 8% en la superficie. El doblado de las probetas se realizó a diferentes temperaturas y se midió la recuperación de la deformación plástica durante el calentamiento posterior. Los valores de recuperación observados en probetas deformadas a  $-60^\circ$  en función de la temperatura de calentamiento se muestran en la Fig. 2. Para deformaciones a una temperatura menor que  $M_f$  la recuperación elástica fue usualmente menor que el 20%, pero la componente plástica fue recuperándose durante el calentamiento y alcanzó el valor máximo de recuperación a una temperatura de  $30^\circ\text{C}$  aproximadamente.

Los datos obtenidos muestran que durante el calentamiento, la relación  $\Delta(\%, \text{recuperación}) / \Delta T$ , depende de la temperatura de recuperación y alcanza un máximo para temperaturas comprendidas entre  $A_f$  y  $10^\circ\text{C}$  aproximadamente. También puede observarse que la recuperación máxima decrece con el incremento de la deformación plástica: para un 4% de deformación la recuperación es del 95% aproximadamente. Más aún, un aumento de la deformación requiere mayores temperaturas para un mismo porcentaje de recuperación.

Con el objeto de observar el comportamiento de la estructura estable a una temperatura en que la reacción  $\beta \rightarrow$  martensita ha finalizado, se deformaron probetas a  $-195^\circ\text{C}$ . En esta experiencia se observó una recuperación de la deformación plástica de casi el 100% durante el posterior calentamiento a una temperatura de  $30^\circ\text{C}$  aproximadamente.

En la Fig. 2 muestra que durante el enfriamiento desde temperatura ambiente (punto a) hasta  $-60^\circ\text{C}$  (punto b), las probetas retornan en un 20% aproximadamente hacia la posición deformada. Durante el calentamiento siguiente, desde  $-60^\circ\text{C}$ , la probeta recupera su forma siguiendo la misma trayectoria en el sentido b-a. Este efecto fue denominado "Efecto de Memoria Secundario" y se observó durante varios ciclos de calentamiento-enfriamiento sin mostrar histéresis.

Los ensayos de compresión se realizaron en una máquina INSTRON, usando un dispositivo que permite mantener la probeta a temperatura controlada durante la experiencia. Se usaron probetas cilíndricas de 5 mm de diámetro y 12 mm de largo. Una curva típica del ensayo de compresión se muestra en la Fig. 3a. En este caso la probeta fue deformada en un 9% a una temperatura de  $-70^\circ\text{C}$  y se obtuvo un 3% de deformación permanente cuando se retiró la carga a  $-70^\circ\text{C}$ . Con el objeto de medir la tensión que puede generarse por efecto de memoria, después de producirse la deformación plástica, se procedió a variar la temperatura manteniendo los extremos de la probeta en posición rígida. La variación de la tensión observada en función de la temperatura se muestra en la Fig. 3b.

Durante el calentamiento de la probeta "con los extremos rígidos", aparece una contribución a la tensión por efecto de expansión térmica. Para evaluar esa contribu-

ción, en un ensayo de dilatación se midió el coeficiente de dilatación de la fase retenida por templado. La Fig. 4 muestra el cambio de longitud en función de la temperatura para una probeta similar a la usada en los ensayos de compresión. Con el valor obtenido para el coeficiente de dilatación  $\theta = 1,6 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$  la expansión ( $\theta \cdot \Delta T$ ) para un cambio de temperatura de 100°C resulta de 0,16% aproximadamente; una deformación de esta magnitud en la Fig. 3a corresponde a un cambio de 0,35 kgf/mm<sup>2</sup> en la tensión. En consecuencia, la contribución a la tensión de recuperación (Fig. 3b), debida a expansión térmica, se espera que sea menor que 0,35 kgf/mm<sup>2</sup>.

Los resultados obtenidos muestran el efecto de memoria mecánica asociado principalmente a la estructura martensítica inducida espontáneamente, dado que la recuperación es máxima para probetas que fueron deformadas a temperaturas de -195°C. A esta temperatura la reacción  $\beta \rightarrow$  martensita ya ha finalizado y es de esperar que la tensión aplicada actúe introduciendo cambios en la estructura de la martensita, aunque se ha postulado para aleaciones de Ti-Ni (1) que puede tener lugar la reacción (martensita)  $\rightarrow \beta \rightarrow$  (martensita)'. Es probable que el efecto de memoria mecánico se deba a una redistribución de las maclas contenidas en la estructura de la martensita, de forma tal que una orientación crezca a expensas de la otra, como ha sido observado en aleaciones de In-Tl (3) y Au-Cd (5).

La recuperación máxima se observó para la deformación plástica menor (4%), lo que sugiere que, a deformaciones mayores la introducción de defectos tiende a estabilizar la estructura deformada a baja temperatura, haciendo necesario un incremento mayor de temperatura  $\Delta T$  para obtener un dado porcentaje de recuperación a medida que se incrementa la deformación plástica. La recuperación de las probetas que fueron deformadas a -60°C no es total ( $\sim 95\%$ ), lo que dejaría en la estructura imperfecciones y/o martensita residual, la cual resulta estabilizada a temperaturas mayores que  $A_f$ . Se puede suponer que las imperfecciones y/o martensita introducidas durante la deformación plástica, y que no desaparecen durante el calentamiento, actúan como centros de nucleación preferencial para la formación de martensita durante los enfriamientos subsiguientes. El crecimiento de la martensita durante los enfriamientos subsiguientes, a partir de los núcleos preferenciales, sería la causa del efecto de memoria secundario.

Para un estudio más directo de las causas que generan el efecto de memoria mecánica en las aleaciones de Cu-Zn-Si y, para probar alguna de las hipótesis anteriores, sería útil realizar observaciones a nivel microscópico y relacionarlas a los datos presentados en este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Jorge E. Kittl la revisión crítica del manuscrito.

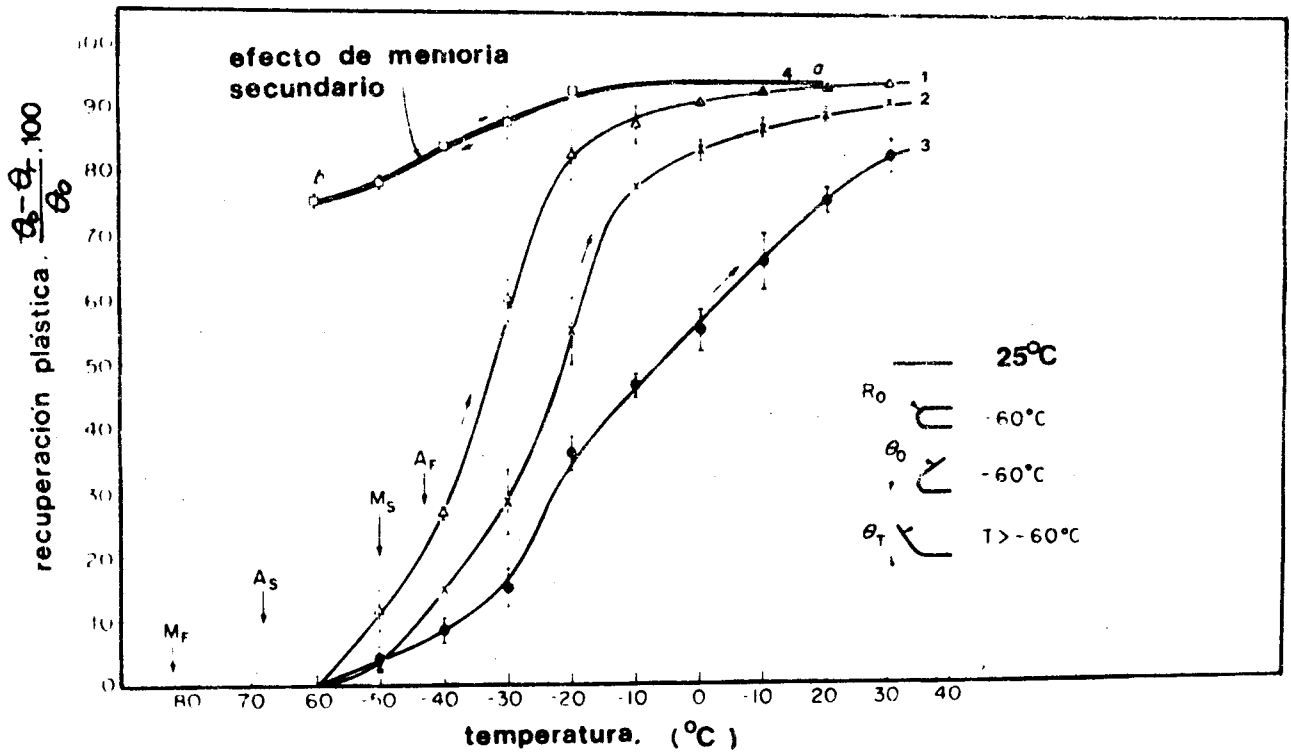


Fig. 2 Recuperación de la deformación plástica producida por doblado vs temperatura. Curva 1, para  $\sim 4\%$  de deformación en la superficie; Curva 2, para  $\sim 6\%$  y Curva 3, para  $\sim 8\%$  respectivamente. En la parte inferior derecha, se muestra esquemáticamente una probeta en diferentes etapas.

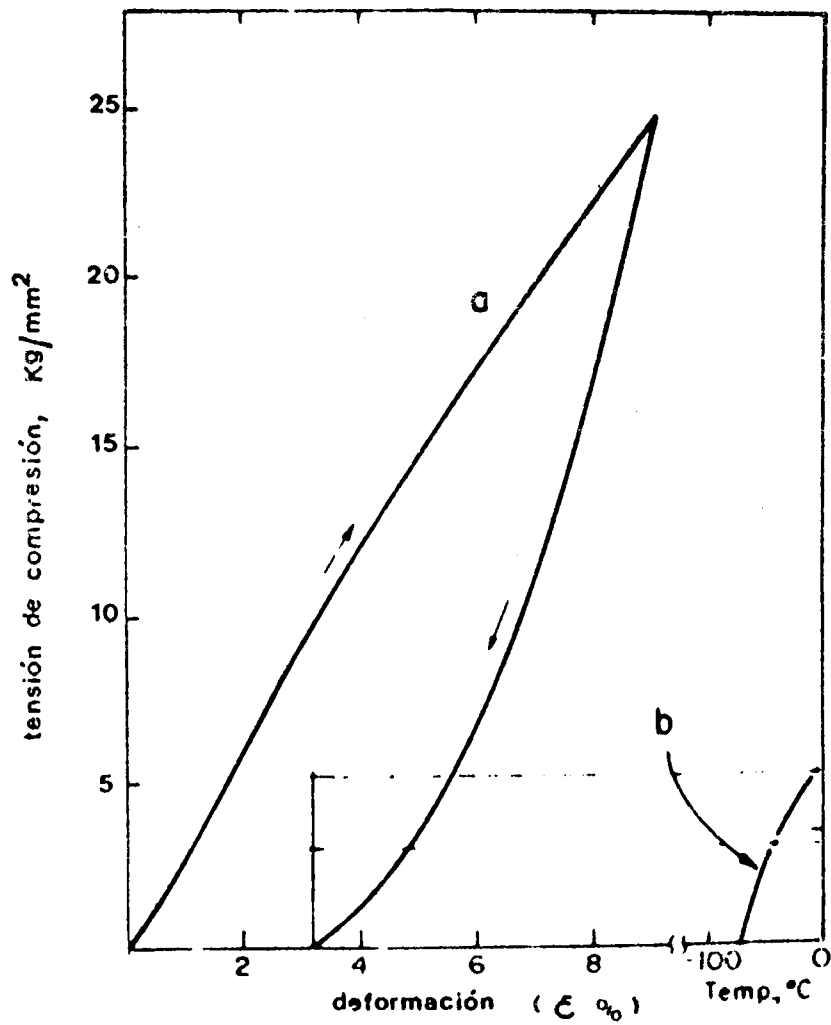


Fig. 3 a) Curva típica de un ensayo de compresión a  $-70^{\circ}\text{C}$   
 b) Tensión de recuperación vs temperatura, para una probeta con extremos rígidos.

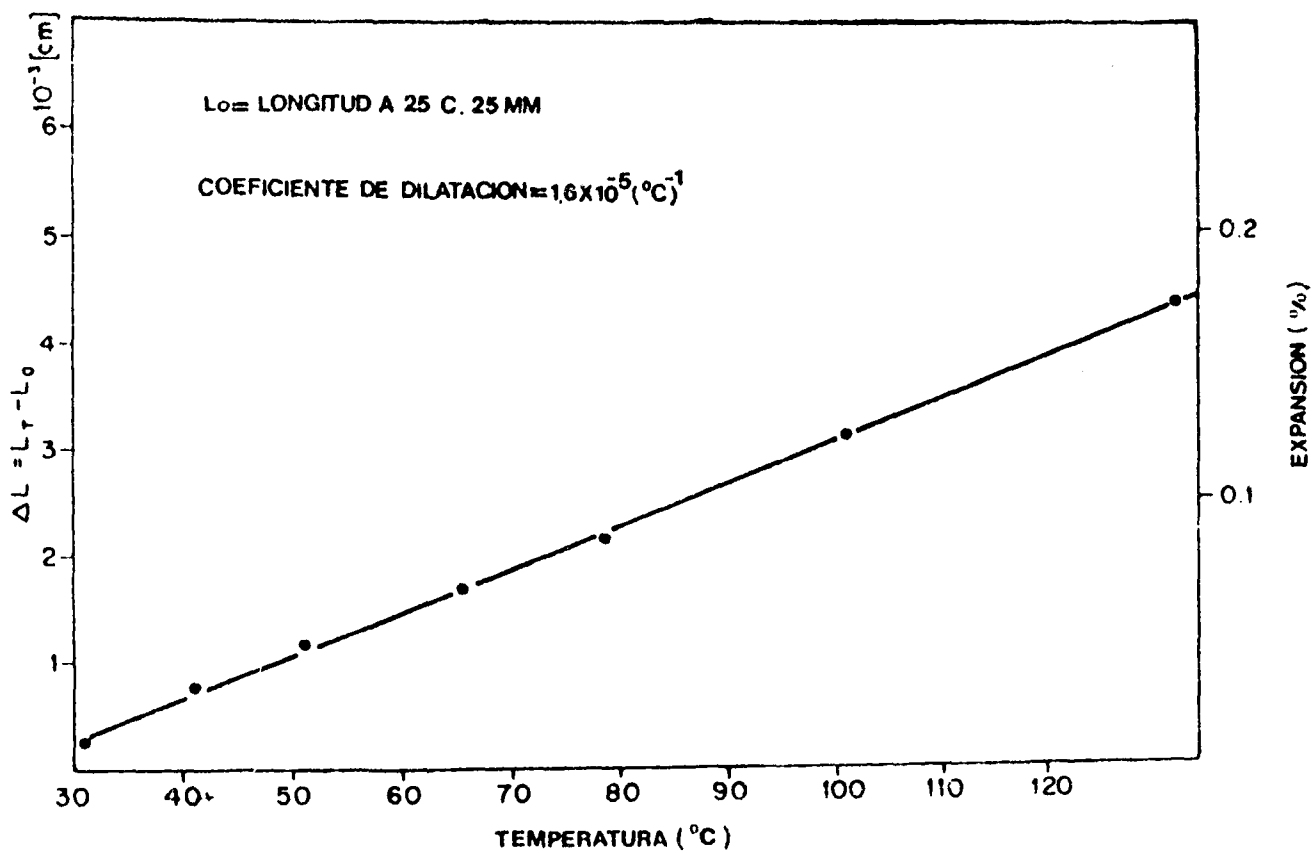


Fig. 4 Dilatación de una probeta en fase  $\beta$  en función de la temperatura.