



Conformado superplástico de la aleación Cd-17.4Zn

J.A. Llanes-Briceño y G. Torres-Villaseñor
Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM
Email: jallb@servidor.unam.mx

(recibido: octubre de 1998; aceptado: noviembre de 1998)

Resumen

Se definen los pasos necesarios para el conformado superplástico de la aleación Cd-17.4Zn. Se comparan la presión atmosférica y el gas a presión como herramientas de conformado. Se determinan los valores óptimos de las variables involucradas (temperatura, deformación máxima e índice de sensibilidad) y se plantea una metodología para la caracterización de futuras aleaciones superplásticas. El conformado superplástico se caracteriza experimentalmente mediante el inflado libre de membranas circulares de 12, 16, 24, 32 y 40 mm de diámetro y tres diferentes espesores (0.4, 0.6 y 0.8 mm).

Descriptores: superplasticidad; aleaciones cadmio-zinc (Cd-Zn); conformado superplástico; tratamientos termomecánicos; nuevas aleaciones.

Abstract

In the present work the necessary steps to carry on the superplastic forming of the Cd-17.4Zn alloy are defined. The use of either atmospheric pressure or gas pressure as forming tools is analyzed. The optimum values of the variables involved (temperature, maximum strain and sensitivity index) are determined while a method for the characterization of future superplastic alloys is set forth. The experimental characterization of the superplastic forming is achieved with free bulging of circular membranes of 12, 16, 24, 32 and 40 mm in diameter and with three different membrane thicknesses (0.4, 0.6 and 0.8 mm).

Keywords: superplasticity; Cd-Zn alloys; superplastic forming; thermomechanical treatments; new alloys.

Generalidades

La transformación del fenómeno superplástico en un proceso de conformado se ha realizado exitosamente desde hace 30 años en los países más prósperos. En un principio, los productos obtenidos mediante procesos de Conformado Superplástico (CSP) eran destinados exclusivamente a las industrias militar y aeroespacial, únicos nichos donde el CSP era rentable. Conforme fueron avanzando las investigaciones sobre superplasticidad y lograron incorporarse nuevas aleaciones superplásticas al mundo comercial, se incrementaron sus aplicaciones, al tiempo que se redujeron sus costos, de tal modo que ahora se utilizan en las industrias aerocomercial, automotriz, ferroviaria y deportiva, entre otras, lo que implica una mayor diversificación en sus aplicaciones¹.

En el departamento de materiales metálicos y cerámicos del Instituto de Investigaciones en Materiales

(IIM) de la UNAM se ha estudiado la superplasticidad en aleaciones metálicas desde 1980. Estas investigaciones se han enfocado principalmente a la obtención y caracterización de aleaciones superplásticas basadas en materias primas nacionales. Como resultado, se han obtenido patentes de aleaciones superplásticas base zinc que se comercializan con la marca registrada "Zinalco" (Torres-Villaseñor, 1988). Actualmente, Llanes-Briceño (1998) estudia las aleaciones superplásticas base cadmio en el laboratorio de superplasticidad, que opera dentro del mencionado instituto desde 1996.

Introducción

El problema de lanzar al mercado una nueva aleación superplástica radica en que ésta debe estar acompañada de una caracterización tanto de sí misma como del proceso de CSP involucrado. En este sentido, en una investigación anterior (Moreno-Ramos, 1988) se indicaba que la composición Cd-17.4Zn (% en peso) mostraba características

¹ Una explicación general sobre el fenómeno de superplasticidad puede ser consultada en Torres-Villaseñor (1997).

superplásticas, información que fue tomada como base para el presente trabajo.

Dado lo anterior, se planteó el objetivo de obtener piezas conformadas superplásticamente de la aleación Cd-17.4Zn al tiempo que se caracterizaba el CSP de la misma, por lo que se decidió utilizar el proceso de conformado superplástico de hembra simple para trabajarlo con lámina, ya que éste es uno de los procesos más utilizados y fáciles de instrumentar; la metodología planteada y los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Experimental

Fundición, laminado y pruebas

Para poder realizar los CSP es necesario tener la aleación en lámina con una microestructura de grano fino de un tamaño menor a 10 micrómetros. Esta microestructura puede ser obtenida desde el proceso de fundición, si se realiza un enfriado rápido, o ser producida con el proceso de laminado. Si el enfriamiento es lento, por ejemplo al aire, se obtiene una microestructura perlítica (figura 1), la cual debe ser transformada con el laminado. Si el enfriamiento es rápido, por ejemplo en agua, la microestructura es de grano fino (figura 2) y el laminado se elabora para ajustar las dimensiones requeridas. Una vez que se concluye este proceso, es necesario obtener los valores de las variables superplásticas, deformación máxima (ϵ) y esfuerzo (σ), para lo cual son realizadas una serie de pruebas de tensión a diferentes velocidades de deformación ($\dot{\epsilon}$) con una temperatura determinada —normalmente > 0.5 de T_{fusion} en grados kelvin, en este caso 130°C — (figura 3). Con base en el hecho de que la superplasticidad se presenta a velocidades de deformación de un orden de 10^{-3} seg^{-1} , las pruebas se realizaron alrededor de este valor, con una variación constante en su orden de magnitud.

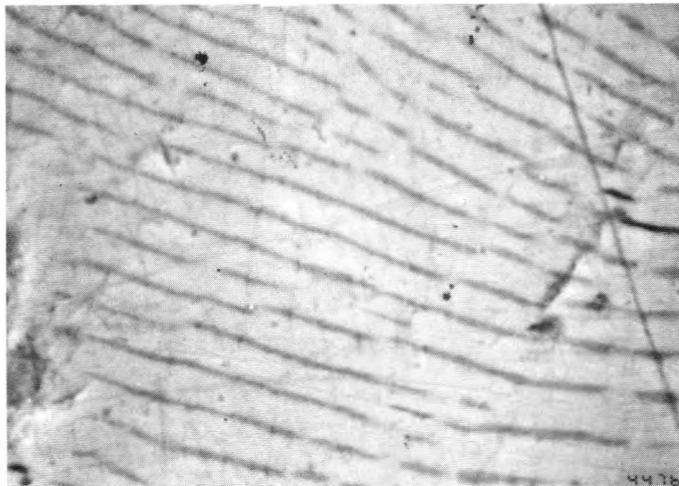


Figura 1. Estructura perlítica (enfriada al aire) Cd-17.4Zn. Amplificación 5000 X

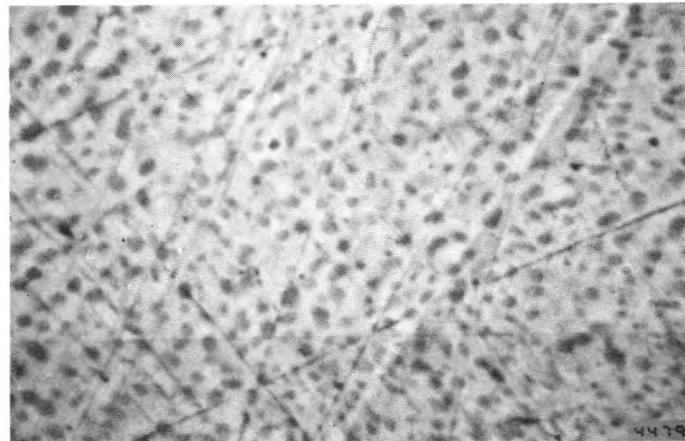


Figura 2. Estructura de grano fino (enfriada en agua) Cd-17.4Zn. Amplificación 5000 X

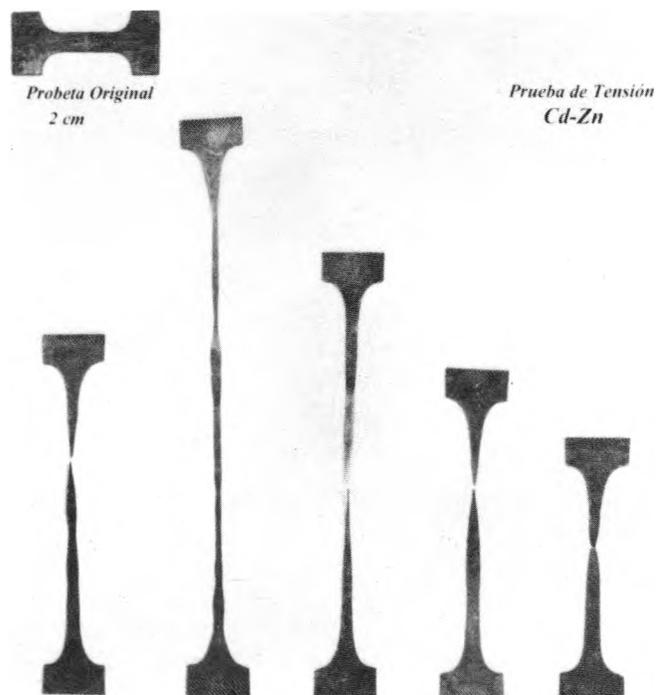


Figura 3. Resultados de las pruebas de tensión

Determinación del índice de sensibilidad "m"

Con los resultados de las pruebas anteriores se obtiene la gráfica $\log \dot{\epsilon} Vs \log \sigma$ clásica de estas aleaciones (figura 4). En este caso, se tomaron los valores directos y se graficaron en una escala logarítmica; en la misma se graficó la $\dot{\epsilon} Vs$ deformación y se obtuvo como resultado la correlación entre rapidez y deformación. La rapidez óptima se encuentra a una velocidad intermedia en la prueba, en la región II de la gráfica (zona de máxima pendiente). El índice de sensibilidad de la rapidez de deformación m está definido como la pendiente de la gráfica $\log \dot{\epsilon} Vs \log \sigma$, que para este caso (temperatura de prueba de 130°C) es de $m=0.70$, medido directo por el método geométrico². Al

analizar la gráfica, se determina que la rapidez óptima de conformado se encuentra entre 1×10^{-4} y 1×10^{-5} seg^{-1} (para esta temperatura y tamaño de grano en particular) y que, como máximo, se obtendrá 800% de deformación.

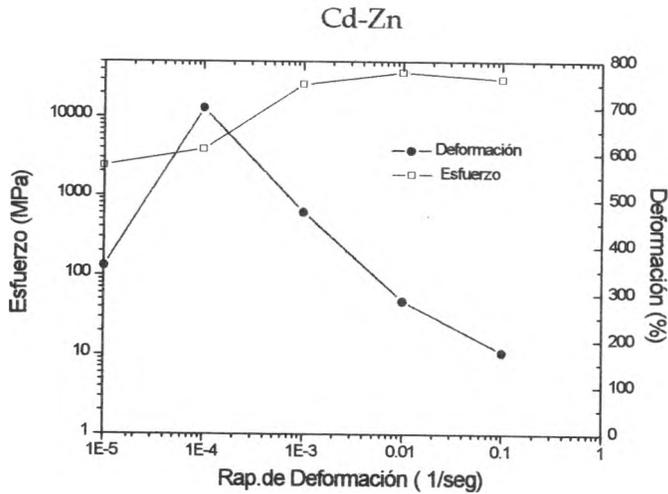


Figura 4. Gráfica $\dot{\epsilon}$ Vs σ y Vs ϵ , a 130°C

Conformado superplástico

Se realizaron pruebas con tres espesores de lámina (0.4, 0.6 y 0.8 mm) para determinar la factibilidad de uso de la presión atmosférica y de un gas a presión como herramientas de conformado. El proceso de CSP seleccionado fue el de hembra simple, el molde fue fabricado en duraluminio con una forma cilíndrica que implicaba una deformación de la lámina al convertirse en un producto terminado de 85%, con una relación $H/D=0.5$, donde H es la altura y D el diámetro original de la lámina a conformar; esta relación es muy importante pues determina la capacidad del CSP. El calentamiento se llevó a cabo con una resistencia de banda que abrazaba al molde, y la temperatura fue controlada por medio de un pirómetro y un relevador. Para las pruebas a presión atmosférica, se utilizó una pequeña bomba de vacío que proporcionó la diferencia de presiones requerida para que la presión atmosférica trabajara como herramienta de conformado. Para el caso de presiones mayores, se utilizó argón como herramienta de conformado. El monitoreo de las presiones utilizadas se facilitó mucho porque el tanque empleado cuenta con reguladores integrados. Cabe aclarar que el uso de gas fue circunstancial, ya que también es posible utilizar un compresor de aire. El sistema de CSP, el cual emplea presión atmosférica, se ilustra en la figura 5.



Figura 5. Sistema completo de CSP

Todas las piezas se conformaron con las mismas dimensiones a 230°C . Lo que nos interesa saber es el tiempo de conformado para los distintos espesores y la variación del espesor en el producto terminado. Los sitios donde se midió el espesor para averiguar la variación del mismo se indican en las figuras 6 y 7. Los resultados de ambos procesos se muestran en la tabla 1. Al comparar los procesos, resalta la ventaja obtenida en el tiempo de conformado cuando se utiliza gas a presión. Con respecto a la variación en el espesor, se ve que en el fondo plano se logra un espesor más uniforme cuando se utiliza presión atmosférica que al utilizar gas a presión; sin embargo, se conservan espesores mayores en la pieza final al usar presión de gas. En las paredes resulta lo contrario; al usar gas a presión, la reducción en el espesor se muestra más uniforme, mientras que con presión atmosférica, las reducciones son más bruscas (véase H_1-H_4 en la tabla 1). En ambos sistemas, el máximo adelgazamiento ocurre en las esquinas y es muy similar para ambos. Así, si el tiempo no es muy importante, podemos utilizar presión atmosférica para obtener un fondo uniforme, o presión de gas para obtener un espesor de pared uniforme.

Variación en el Espesor causado por el proceso de Conformado Superplástico



Figura 6. Variación en el espesor causado por el CSP

² Acerca de las diferentes maneras de obtener "m" y los problemas e incongruencias al respecto, véase a Enikeev (1997).

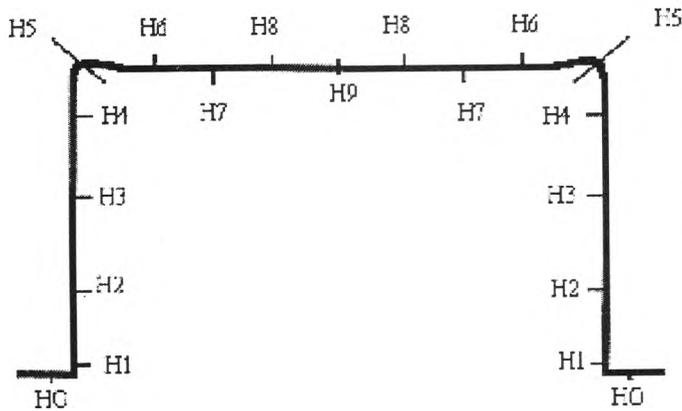


Figura 7. Esquema que muestra de dónde fueron tomadas las medidas de H

Análisis de la profundidad de deformación en función del diámetro

Tener información básica acerca del comportamiento de cierta aleación durante el conformado es de gran importancia al momento de llevar los procesos a un nivel industrial, pues permite saber qué tanta profundidad de deformación se puede obtener en función del claro de lámina disponible, así como el grado de complejidad que puede obtenerse a partir de un dispositivo ya instalado.

Teniendo esto en cuenta, se mandó fabricar una placa de acero con círculos internos de diferentes diámetros que se acoplara al molde circular; se inscribieron cinco círculos con diámetros de 11.9, 16.0, 24.1, 32.1, 40.2 mm.

El procedimiento consistió en realizar conformados de los tres diferentes espesores estudiados a diferentes temperaturas y presiones. El tiempo de conformado para un grupo de láminas (tres espesores de lámina a las mismas P y T) lo delimita el conformado de 0.4 mm de espesor, pues es la lámina que falla más rápido. Para que las pruebas sean comparativas, los otros dos espesores se prueban con el mismo tiempo con el que falló la primera. Una vez realizada la prueba, se miden las respectivas profundidades máximas de deformación (H) desde la posición original de la lámina

hasta el polo de la esfera formada. Dos ejemplos de los conformados obtenidos se muestran en la figura 8. Se grafican los valores obtenidos de profundidad de deformación, en función del diámetro original para un espesor dado a temperatura y presión constantes. Para ello, se agrupan los comportamientos de los tres diferentes espesores conformados bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y tiempo. Al estudiar las gráficas se puede tener una idea de la tendencia, que permite extrapolaciones. Las dos gráficas más significativas se presentan en las figuras 9 y 10. El utilizar un gas a presión como herramienta de trabajo tiene como consecuencia la disminución del tiempo de falla de la lámina delgada y el necesario para lograr deformaciones similares a las registradas con presión atmosférica en los otros espesores. Digna de mención es la prueba a 230°C, donde el resultado, en todos los casos, fue un incremento de la altura de deformación obtenida.

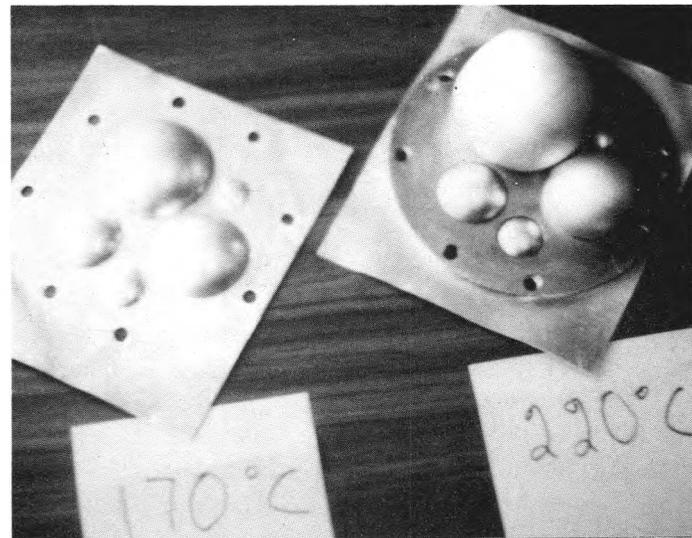


Figura 8. Conformado de diferentes diámetros, garantizando las mismas condiciones de microestructura, temperatura, presión y tiempo de conformado. También, el efecto que tiene el incremento de temperatura en la deformación

Tabla 1. Comparación de los procesos de conformado superplástico utilizando presión atmosférica y presión de gas como herramientas de conformado

E ₀	Presión	Tiempo	Espesor del producto final (mm)									
			H ₀	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉
0.8	ATM	4' 18	0.75	0.40	0.29	0.21	0.16	0.20	0.28	0.30	0.31	0.35
0.8	200 KPa	59	0.70	0.70	0.55	0.30	0.20	0.15	0.22	0.30	0.35	0.45
0.6	ATM	3'	0.59	0.30	0.22	0.19	0.15	0.15	0.20	0.26	0.29	0.30
0.6	200 KPa	40	0.59	0.50	0.32	0.22	0.15	0.12	0.15	0.18	0.21	0.25
0.4	ATM	2' 11	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.04	0.05	0.10	0.11	0.12
0.4	200 KPa	25	0.35	0.30	0.20	0.13	0.10	0.06	0.10	0.11	0.15	0.17

Cd-Zn; T=200°C; P=200kPa; t=1min

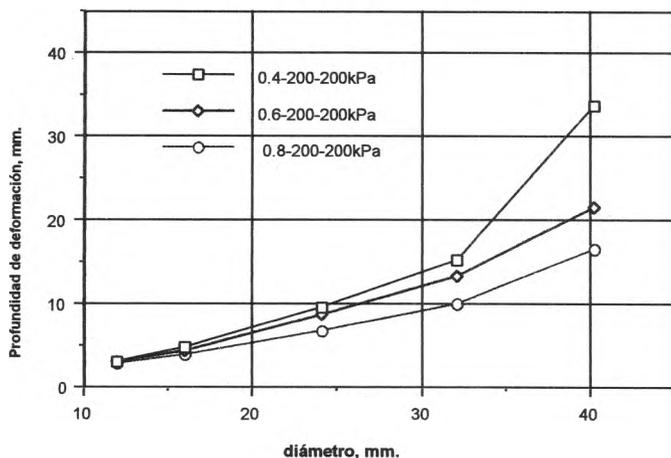


Figura 9. Profundidad de deformación en tres espesores (0.4, 0.6 y 0.8 mm) a $P=200$ kPa y $T=200^\circ\text{C}$

Cd-Zn; T=230°C; P=200kPa.; t=25 seg

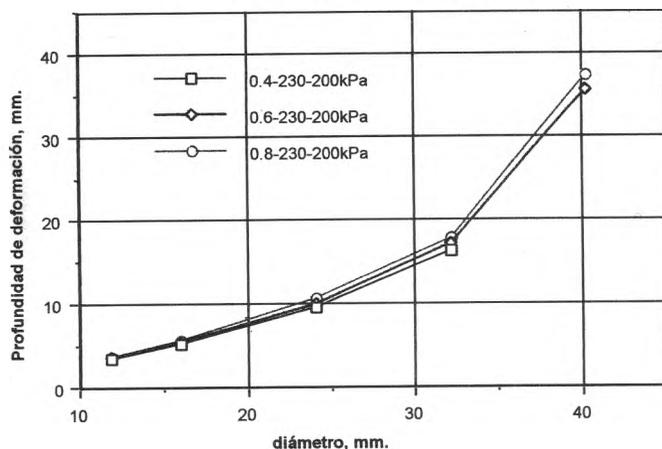


Figura 10. Profundidad de deformación en tres espesores (0.4, 0.6 y 0.8 mm) a $P=200$ kPa y $T=230^\circ\text{C}$

Al comparar las dos gráficas se puede observar claramente como el incremento de la temperatura de conformado hace más compacta la familia de gráficas con un comportamiento exponencial; a mayor diámetro (claro disponible), mayor profundidad. En todas las pruebas anteriores, la altura máxima de deformación se obtuvo con el espesor de 0.4 mm, lo que se explicaba fácilmente: entre más delgada la lámina, menos resistencia y más deformación; pero eso no quiere decir necesariamente que se estuviera haciendo uso pleno del mecanismo superplástico de deformación, como se comprobó con las pruebas a 230°C y 200 kPa. La altura de deformación obtenida con la lámina de 0.4 mm fue menor a la correspondiente de 0.6 mm y esta, a su vez,

fue menor a la obtenida con la de 0.8 mm. Bajo estas circunstancias, y considerando todas las pruebas anteriores, podemos afirmar que la temperatura ideal de conformado se encuentra entre 230 y 240°C .

Con base en los resultados obtenidos en esta serie de pruebas, se puede generalizar que todas tienen la característica de presentar la mayor deformación en los claros con mayor diámetro (figuras 9 y 10). La presión requerida para deformar un claro de lámina inscrito en una circunferencia dada es inversamente proporcional al área del claro original; esto se ve claramente al tener las máximas deformaciones en los diámetros más grandes; la comparación es directa por tratarse de pruebas a una carga constante en los diferentes diámetros —el CSP es simultáneo—; así, a mayor diámetro, mayor deformación con la misma carga. El siguiente análisis generaliza dicho comportamiento:

$$\varepsilon \propto A \quad P \propto \frac{1}{A}$$

donde ε =deformación; A =área del claro inicial y P =presión requerida para lograr la deformación.

En un trabajo reciente, Torres-Villaseñor, Aguilar-Viguera y Llanes-Briceño (1998) muestran un modelo matemático que representa este tipo de comportamiento.

Posibles aplicaciones

En años recientes, el cadmio (Cd) ha sido satanizado por ser un contaminante peligroso cuando se encuentra en forma de compuestos suspendidos en el aire (óxidos, sulfuros). Sin embargo, como metal no es realmente un contaminante y puede pensarse en aplicaciones en las cuales no esté en contacto directo con los humanos; por ejemplo, la confección barata de botes de basura para la vía pública, carcasas para lámparas y todos aquellos productos que puedan ser obtenidos a partir de lámina termoformada, como recipientes no alimenticios. En general, al producir cualquier producto donde la demanda sea menor a 10 000 piezas, los CSP son realmente competitivos tanto en equipos necesarios para la producción, como en el gasto energético involucrado. Cabe aclarar que para producciones mayores a 10 000 piezas, los costos por pieza de sistemas de troquelado y forjado son más competitivos.

Conclusiones

Acerca de la aleación Cd-17.4Zn concluimos que:

- √ La presión requerida para deformar un claro de lámina inscrito en una circunferencia dada es inversamente proporcional al área del claro original.

- √ Dado lo anterior, se tiene que para copiar pequeños detalles del fondo en una pieza compleja, las presiones a utilizar deben ser considerablemente mayores a las del conformado inicial (ya que ahí se tienen claros de conformado muy pequeños), por lo que en esos casos se debe incrementar la presión por unos segundos al final del conformado.
- √ La temperatura óptima de conformado es de 0.93 a 0.95 de la temperatura de fusión en escala absoluta (para este caso 230-240°C). Con ésta se han podido obtener relaciones $H/\Delta > 1$ y conviene probar cualquier otra aleación a estas temperaturas —queda comprobado que el 0.5 de la temperatura de fusión es la requerida para que se presente la propiedad superplástica, pero de ninguna manera es la óptima para el conformado—.
- √ Presiones de 200 y 400 KPa son adecuadas para conformar lámina con espesores de 0.6 y 0.8 mm. Para espesores de 1.0 mm y superiores, presiones de 650 kPa han dado buenos resultados. Relaciones de deformación del orden de $H/D=0.5$ son excesivas para espesores de 0.4 mm y menores. Y por último, en los espesores mayores podemos esperar una reducción en el fondo del orden de 50 a 60%.
- √ El índice de sensibilidad a la rapidez de deformación (m) es de 0.70 a 130°C.

En general, en los *procesos de CSP*, se tiene que:

- √ Utilizar un gas a presión como herramienta de trabajo (o en su defecto, la presión atmosférica) es totalmente factible. La viabilidad del uso de procesos de termoformado para la formación de metales superplásticos ha quedado demostrada.
- √ Los moldes que se utilizan para estos procesos de conformado no requieren acabados especiales ya que no están sometidos a desgaste.
- √ Los equipos y moldes requeridos para empezar una industria de conformados superplásticos que partan de lámina son relativamente (y comparativamente)

más baratos que su equivalente de manufactura convencional.

- √ Dadas todas estas circunstancias, podemos concluir que el explotar industrialmente el conformado superplástico es una verdadera oportunidad para países con pocos recursos.

Referencias

- Enikeev F.U. (1997). Strian-Rate Index m: Definition, Determination, Narrowness. ICSAM 97.
- Llanes-Briceño J.A. (1998). Conformado superplástico de la aleación Cd-Zn. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.
- Moreno-Ramos J.E. (1988). Propiedades mecánicas de aleaciones superplásticas del sistema Cd-Zn. Tesis de maestría en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.
- Torres-Villaseñor G. (1988). Microestructura y propiedades mecánicas del zinalco. *Revista Ciencia*, No. 39, 103-111.
- Torres-Villaseñor G. (1997). Metales que se comportan como plásticos. *Investigación y Ciencia*, No. 248, 80-85.
- Torres-Villaseñor G., Aguilar-Vigueras H. y Llanes-Briceño J. A. (1998). Experimental Relationships Between Maximum Gap and Depth of the Mold During Superplastic Forming. Third Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, Honolulu, Hawaii, USA, julio.

Bibliografía sugerida

- Nieh T.G., Wadsworth J. y Sherby O.D. (1997). *Superplasticity in metals and ceramics*, Cambridge University Press. Reino Unido.
- Padmanabhan K.A. y Davis G.J. (1980). *Superplasticity - mechanical and structural aspects, environmental effects, fundamentals and aplicaciones*, Alemania, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Nueva York.
- Pilling J. y Radley N. (1989). *Superplasticity in crystalline solids*, The Institute of Metals. Inglaterra.

Semblanza de los autores

Jorge Antonio Llanes-Briceño. Ingeniero mecánico electricista egresado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. A partir de 1995, se integró como becario en el Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, donde presentó su tesis de licenciatura en 1998 obteniendo mención honorífica. Durante 1996 y 1997, estuvo en el laboratorio de superplasticidad dentro del mismo Instituto, donde impartió esa materia. Es coautor de diversas ponencias presentadas en foros y congresos nacionales e internacionales.

Gabriel Torres-Villaseñor. Doctor en ciencia de materiales, obtuvo el Premio Nacional en Ciencias y Artes en 1992. Es decano de los investigadores del Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM e investigador nacional SNI nivel III. Actualmente, realiza investigaciones sobre las propiedades de los metales producidos en México, con el propósito de ampliar sus aplicaciones.