
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

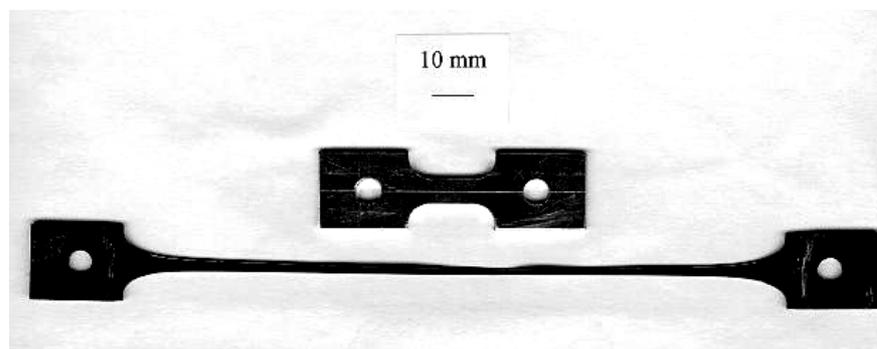


DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LECTURAS DE INGENIERÍA 10
SUPERPLASTICIDAD



M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2008

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Ciencia y Tecnología actuales implican la generación y aplicación del conocimiento en muchas áreas y consecuentemente el estudiante de Ingeniería debe estar al tanto de los mismos, sin embargo, debido a la actualización poco frecuente de los programas y planes de estudio y por las limitaciones propias de semestres de apenas cuatro meses de actividades académicas, es difícil la actualización del estudiante en dichos conocimientos, además, dejar trabajos de investigación no funciona de la manera deseada, ya que en muchas ocasiones se descargan de Internet y se imprimen sin leerlos siquiera, de ese modo, surge la idea de crear una serie de apuntes de temas básicos para el ingeniero actual como son: el endurecimiento superficial del acero, las fundiciones de hierro, la tribología y el desgaste, la superplasticidad, los avances en la industria siderúrgica, superaleaciones, etc.

En éste trabajo (ya es la Décima Lectura), se presenta a la Superplasticidad, la cual es un fenómeno interesante que se presenta incluso en algunas aleaciones muy resistentes, como es el caso de la aleación Ti-6Al-4V, que está constituida principalmente por titanio, metal que se caracteriza por su dureza. La superplasticidad es una característica que presentan algunos materiales, generalmente a temperaturas que van de los 0.5 a los 0.75 T_m (temperatura de fusión) y que consiste en la elongación del material varias veces su tamaño original antes de fracturarse; dicho de otro modo, el material tiene la capacidad de desarrollar deformaciones permanentes muy grandes antes de romperse, esto bajo determinadas condiciones físicas; cualidad que permite fabricar metales que se puedan estirar más de lo normal antes de romperse, tendiendo a ser más livianos y resistentes a los esfuerzos, a la fatiga y a tolerar altas temperaturas sin perder sus cualidades, esto permite fabricar piezas de formas complejas a través de un proceso continuo de deformación.

Este es un fenómeno complejo, e inclusive aún no se sabe a ciencia cierta que lo ocasiona, pues nace de la elaborada dinámica de los átomos que conforman la aleación. Aunque estudios hechos recientemente sobre este fenómeno, han demostrado que los materiales que pueden presentar superplasticidad, son aquellos que cuentan con un tamaño de grano muy fino y con un arreglo de granos equiaxial.

Hoy en día la superplasticidad ha sido usada para desarrollar un nuevo tipo de conformado, conocido como conformado superplástico, el cual está revolucionando la industria de la transformación, pues estos materiales, mediante este proceso pueden conformarse en formas complejas al poder inyectar el material en estado cuasilíquido, en un molde y replicar perfectamente la superficie y forma de este, de modo que pueden reducirse o incluso eliminarse muchos de los pasos de soldadura, corte, mecanizado y otros que representan más del 30% del coste de manufactura de la mayoría de los productos de acero.

Como siempre cualquier comentario o corrección será bienvenido.

ATTE.

Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CAPÍTULO 1 ¿QUÉ ES LA SUPERPLASTICIDAD?

1.1.- ANTECEDENTES.

Observaciones de lo que parecía ser un comportamiento superplástico fueron hechas a finales de los años 20's del siglo pasado, obteniéndose elongaciones máximas del 360% para la aleación eutéctica Cd-Zn a 20 °C, con velocidades de deformación de $\sim 10^{-8}$ 1/s., y de 405% a 120 °C, con velocidades de deformación de $\sim 10^{-6}$ 1/s. También se reportaron elongaciones del 410% para la aleación eutéctica Pb-Sn a temperatura ambiente, pero con velocidades de deformación de $\sim 10^{-6}$ 1/s.

En el mundo occidental, había menor interés en estas observaciones, pues eran vistas mas como una curiosidad de laboratorio. Algunos años mas tarde, estudios llevados a cabo en la URSS, descubrieron el mismo fenómeno, y el termino superplasticidad fue inventado por Bochvar y Sviderskaya en 1945, para describir la amplia ductilidad observada en aleaciones de Zn-Al. La palabra superplasticidad se deriva del prefijo latino super, que significa exceso o excesivo, y de la palabra griega plásticos, que significa dar forma a; el término sverhplastichnost fue usado en artículos escritos por Bochvar, en el idioma ruso y posteriormente fue traducido como superplasticidad. En 1962, Underwood revisó algunos trabajos previos sobre superplasticidad y fueron estos trabajos, junto con el subsiguiente trabajo de Backofen y sus colegas reportado en 1964, los precursores del presente y expansionista interés científico y tecnológico sobre la superplasticidad.

Inicialmente la deformación superplástica fue considerada como un fenómeno único e inherente solo para algunas aleaciones. Sin embargo, estudios sistemáticos mostraron su carácter más general en comparación con la deformación

convencional. En realidad, este efecto puede ser observado no solamente en metales sino también en intermetaloides y cerámicos los cuales, como es sabido, se caracterizan por su fragilidad a la fractura bajo condiciones comunes y no muestran características de flujo plástico. La principal razón por la que algunos materiales pueden ser deformados superplásticamente y otros no, está relacionada en cómo estos materiales responden mecánicamente a los cambios en la velocidad de deformación.

Los materiales superplásticos son sólidos policristalinos, los cuales tienen la capacidad de someterse a grandes deformaciones plásticas uniformes de entre unos cuantos cientos a unos cuantos miles por ciento, sin presentar estricción o formación de cuello (adelgazamiento local) antes de fallar, éstos materiales, al ser deformados, se adelgazan de una manera muy uniforme, en lugar de formarse un cuello. La formación de éste cuello es la que conduce al material a la fractura. Algunos materiales muestran plasticidad adicional como resultado de cambios en la estructura cristalina. A esto se le llama plasticidad inducida por deformación, pero su origen es distinto al de la superplasticidad.

Elongaciones, en deformaciones uní-axiales a tensión, que exceden el 200% antes de fallar son usualmente indicación de superplasticidad, aunque muchos materiales pueden alcanzar elongaciones mayores al 1000%. Las mayores elongaciones reportadas son de 4850% y 7750% en aleaciones eutécticas de Pb-Sn y de 5500% y mayores a 8000% para aluminios al bronce. Inclusive, se ha podido observar superplasticidad en aleaciones de titanio, como la aleación Ti-6Al-4V; y en el caso de los materiales cerámicos, se han reportado elongaciones mayores al 400%. Estas elongaciones son pequeñas en comparación con las obtenidas comúnmente en materiales metálicos, pero mucho mayores que el 1 o 2% normalmente observadas

en cerámicos estructurales. Una deformación del 180% a temperatura ambiente es suficiente para considerar al un material como superplástico.

Cabe mencionar que las aleaciones superplásticas que más futuro tienen, son las basadas en los metales más abundantes en la corteza terrestre como lo son el hierro y el aluminio, sin embargo, las más sencillas de fabricar son las basadas en el eutectoide zinc-aluminio como lo es el Zinalco. Pudiendo estas aleaciones sustituir a los plásticos en diversas aplicaciones, con la ventaja de ser éstas cien por ciento reciclables.

Uno de los problemas básico en la deformación superplástica es la explicación del proceso mediante el cual se producen grandes deformaciones macroscópicas sin prácticamente ningún cambio en la forma de los granos.

Se ha observado que el fenómeno de la superplasticidad ocurre, tanto a velocidades de deformación, a las cuales la resistencia a la formación del cuello es significativa, como dentro de ciertos rangos de temperatura, que generalmente se encuentran dentro de un estrecho rango que se encuentra entre los 0.5 y 0.75 T_m (temperatura de fusión), y que además el material cuenta con una microestructura que consiste en granos ultra finos equiaxiales y uniformes, la cual se mantiene durante la deformación superplástica.

1.2.- CARACTERÍSTICAS DE UN MATERIAL SUPERPLÁSTICO.

Para el comportamiento superplástico, el material debe ser capaz de ser procesado para obtener una estructura de grano fino equiaxial. El tamaño del grano de los materiales superplásticos debe de ser tan pequeño como sea posible, pero normalmente encontrarse dentro del rango de los 2 a los 10 μm ; aunque una

cantidad limitada de superplastisidad se puede observar para materiales con un tamaño de grano de 20 μm o inclusive mayor.

Desafortunadamente el solo hecho de conseguir un tamaño de grano fino no es suficiente para garantizar que el material presentará superplasticidad, debido a que se necesita que el tamaño de grano permanezca estable durante el proceso de deformación sin que se presente crecimiento de grano a la temperatura a la que se lleve a cabo está. Se ha observado que durante la deformación superplástica ha habido crecimiento del grano en ciertos materiales, con un entendimiento del tamaño de grano mayor en la parte deformada superplasticamente, que en las áreas no deformadas. Está claro que el crecimiento del grano promovido por la deformación es un gran problema en la deformación superplástica.

Los materiales microduplex son materiales procesados termodinámicamente para dar un grano fino o una fase. El crecimiento del grano esta limitado por tener una microestructura que consiste de proporciones ásperas iguales de dos o más fases químicas o estructuralmente diferentes. Este último grupo de materiales, incluye las aleaciones de titanio, aceros inoxidable, aleaciones de cobre, eutecticos (como el Zinalco) y algunos cerámicos. A la superplasticidad debida a un tamaño de grano fino equiaxial se le conoce como superplasticidad microestructural o de micrograno, ésta se presenta con un tamaño de grano usualmente menor a 10 μm , deformándose generalmente a velocidades de entre 10^{-5} y 10^{-1} 1/s, y a temperaturas mayores a $0.5T_m$. Aunque ha habido reportes de materiales que presentan superplasticidad a velocidades mayores y temperatura ambiente.

La deformación superplástica se caracteriza por esfuerzos a la fluencia bajos. Esto en combinación con la alta uniformidad de flujo plástico, ha llevado el conformado superplástico a un considerable interés, ya que, usando técnicas similares a las desarrolladas por el conformado por inyección de termoplásticos, es posible el conformado de componentes.

En la superplasticidad, los límites de grano en la aleación deben permitir que los granos se deslicen con facilidad entre sí y giren cuando se aplica esfuerzo. Para que se presente el deslizamiento de límites de grano, es necesario que haya una temperatura adecuada y un tamaño de grano fino, ya que esto sucede por termofluencia.

La naturaleza física de este fenómeno es muy compleja. Se han sugerido muchas hipótesis plausibles sobre el origen micromecánico de la superplasticidad en materiales de grano fino, pero aún ninguna ha sido encontrada capaz de describir precisamente las características tanto mecánicas como microestructurales de la deformación superplástica; tan solo recientemente, parece que la mayoría de la deformación superplástica puede explicarse mediante la operación de un mecanismo usual de deformación llamado, deslizamiento del límite de grano (o GBS por sus siglas en inglés), donde los granos que componen el metal se resbalan uno sobre otro, en lugar de utilizar el mecanismo de dislocaciones clásico, mediante el cual los metales de uso ingenieril se deforman. Aquí también, las dislocaciones intragranulares se deslizan y hay difusión por deslizamiento, y no por los mecanismos convencionales de dislocación en el interior del grano. Sin embargo, los últimos datos han mostrado que este fenómeno es condicionado por la acción de un mecanismo específico de deformación-cooperativa de deslizamiento del límite de grano (o CGBS por sus siglas en inglés). La acción de este mecanismo de deformación, no depende del tipo de arreglo cristalino y de las dislocaciones

presentes, si no más bien depende de longitud del área de dispersión y de la estructura de los límites de granos en un policristal. La contribución del deslizamiento del límite de grano a la deformación plástica es más substancial mientras mas grande sea la superficie del límite de grano por unidad de volumen, debido a que la superficie del límite de grano es inversamente proporcional al tamaño de grano. Esto explica el porque la contribución del deslizamiento del límite de grano es menos importante en materiales con granos de tamaño grande.

1.3.- ASPECTOS MECÁNICOS DE LA SUPERPLASTICIDAD.

La característica mecánica más importante de un material superplástico es la alta sensibilidad que tiene la resistencia a la fluencia, a la velocidad de deformación, se denota por m , y matemáticamente se define como:

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m \dots\dots\dots(1.1)$$

Donde: σ es el esfuerzo de fluencia, $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación, K es una constante proporcional del material que corresponde al esfuerzo necesario para obtener una velocidad de deformación de $1 \text{ }^1/\text{s}$. y depende de la temperatura y la microestructura del material; y m es el factor de sensibilidad por esfuerzo (factor de sensibilidad a la velocidad de deformación).

La dependencia del esfuerzo σ y la sensibilidad a la velocidad de deformación m , sobre la velocidad de deformación se muestra en la figura 1.1, en donde se puede apreciar que el esfuerzo σ se incrementa más rápidamente que la sensibilidad a la velocidad de deformación m en respuesta a los cambios en la velocidad de deformación. Además, el pico en la sensibilidad a la velocidad de deformación m ocurre en un régimen en el cual el esfuerzo exhibe el cambio mas pronunciado con el incremento de la velocidad de deformación. Este es el régimen en el cual es más probable que ocurra la superplasticidad.

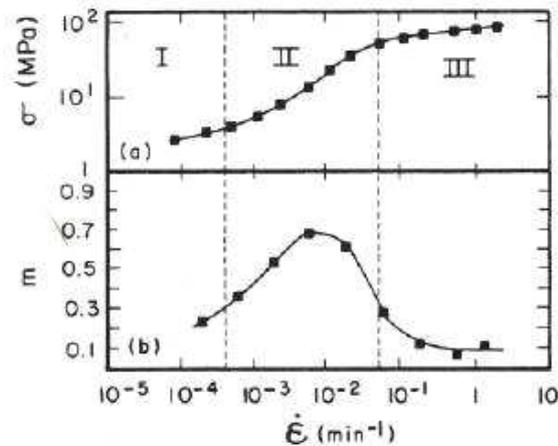


Figura 1.1 Dependencia de la velocidad de deformación con (a) el esfuerzo (b) sensibilidad a la velocidad de deformación en una aleación eutéctica Zn-Al (tamaño del grano 10 μm) probada a 350 $^{\circ}\text{C}$.

Para el comportamiento superplástico, m debería ser mayor o igual que 0.5, aunque para la mayoría de materiales superplásticos, m se encuentra en el rango de 0.4 a 0.8. El factor de sensibilidad de la velocidad de deformación m es una medida de la oposición a la formación del cuello, que el material presenta durante la deformación superplástica. Por tanto, la habilidad de un material a deformarse superplásticamente está fuertemente relacionada con su resistencia a la formación del cuello durante el proceso de deformación. La presencia de la formación de cuello en un material sujeto a esfuerzos a tensión da por resultado una alta velocidad de deformación local y, para un valor alto de m , un incremento pequeño en la resistencia a la fluencia dentro de la región del cuello. Por lo tanto, el cuello pasa por velocidades de deformación de endurecimiento, las cuales inhiben su desarrollo posterior permitiendo que continúe la deformación uniforme. De este modo, una sensibilidad alta de velocidad de deformación otorga una alta resistencia a la formación del cuello y esto da como resultado grandes deformaciones por elongación, características de los materiales superplásticos. La figura 1.2 muestra esquemáticamente como un valor alto de m inhibirá la inestabilidad por la tensión (formación del cuello) y consecuentemente, aumentará la plasticidad ante la tensión.

Si el material tiene un valor de m alto, esta inestabilidad será inhibida por los efectos de endurecimiento por esfuerzos localizados.

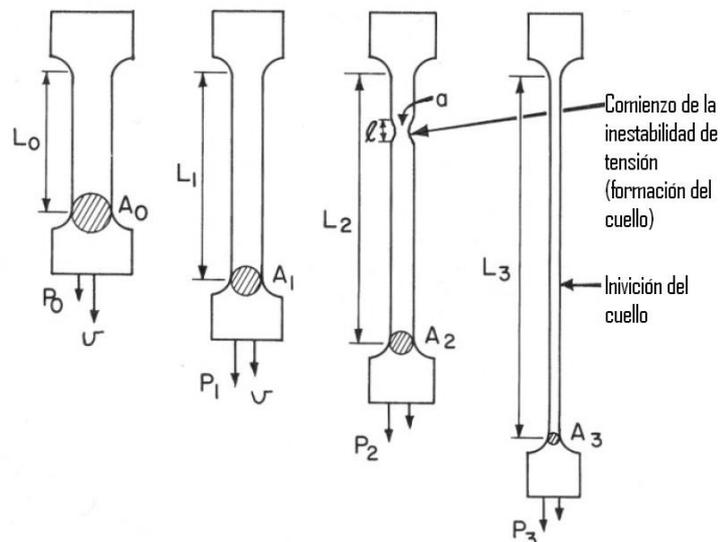


Figura 1.2 Representación esquemática de la deformación plástica a tensión con formación e inhibición de cuello.

La deformación continúa hasta concentrarse totalmente en el cuello con la consecuente reducción del área, esto debido a que el volumen debe permanecer constante, ocasionando finalmente la falla. La figura 1.3 muestra las dos trayectorias alternativas una vez pasado el máximo en la curva esfuerzo-deformación. De esta manera se puede concluir que la superplasticidad es el resultado de la inhibición de la formación del cuello, resultado de un valor de m alto.

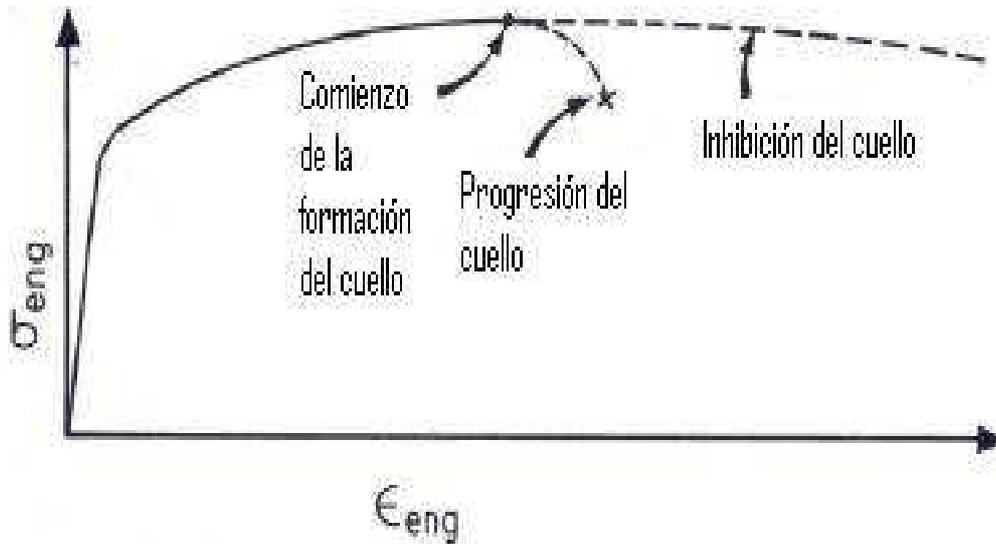


Figura 1.3 Curvas Esfuerzo - Deformación de Ingeniería

1.4.- FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA SUPERPLASTICIDAD.

La máxima ductilidad depende de la velocidad de deformación impuesta, de la temperatura y del tamaño inicial del grano. El comportamiento mecánico de los materiales superplásticos es bastante sensible, tanto a la temperatura como al tamaño de grano. En general, al incrementar la temperatura o al disminuir el tamaño de grano del material, se tiene un efecto parecido en la variación, al del esfuerzo de fluencia con la velocidad de deformación. La cantidad de deformación superplástica tiende a ser mayor con el incremento de la temperatura y con un tamaño de grano más pequeño; al incrementar la temperatura, disminuye el esfuerzo a la fluencia, particularmente a una velocidad de deformación baja. Se ha encontrado que la sensibilidad máxima a la velocidad de deformación m se incrementa al aumentar la temperatura, permitiendo esto incrementar la velocidad de deformación. Estos efectos de la temperatura y la velocidad de deformación (ϵ), con respecto al esfuerzo (σ) y a la deformación total ($\Delta L/L_0$) se muestran en la figura 1.4. Estos datos corresponden a los de una aleación Zn-22Al. Los posibles efectos de la disminución del tamaño de grano y el incremento de la temperatura durante el

esfuerzo y la sensibilidad a la velocidad de deformación están ilustrados en la figura 2.5. La ductilidad mas alta medida por la elongación se encuentra usualmente a una velocidad de deformación intermedia. Incrementar la temperatura de deformación reduce el esfuerzo de fluencia y causa mayores velocidades de deformación entre las regiones I y II y II y III.

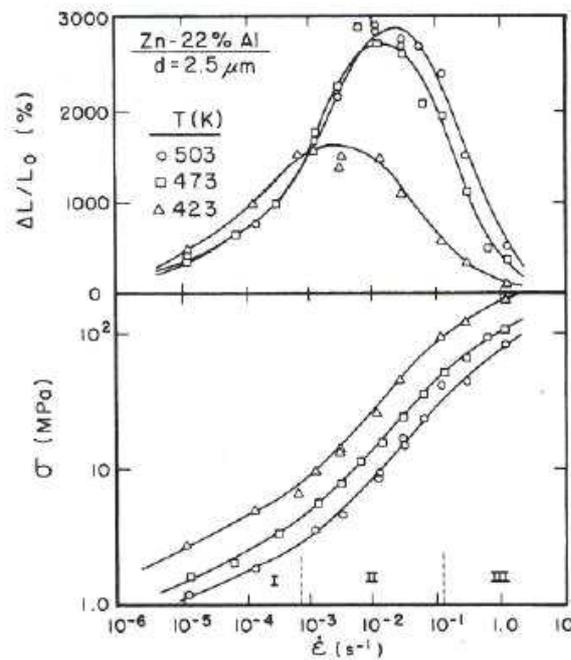


Figura 1.4 Dependencia de la deformación a tensión a la fractura y del esfuerzo a la velocidad de deformación.

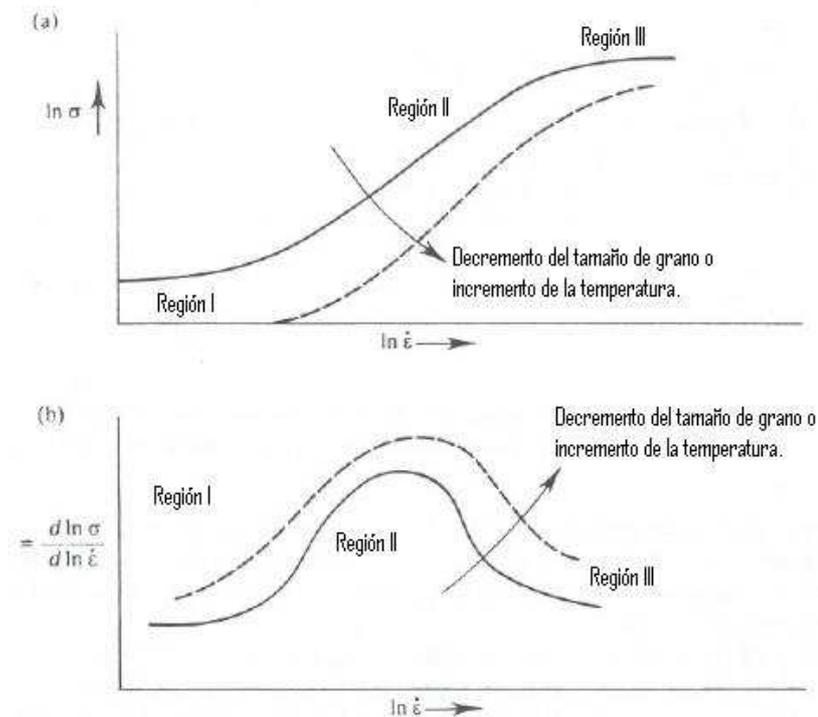


Figura 1.5 (a) Comportamiento del esfuerzo-velocidad de deformación a esfuerzos bajos de un material el cual manifiesta superplasticidad. En las regiones I y III, la sensibilidad a la velocidad de deformación (figura (b)) es muy pequeña, mientras que es alta en la región II donde se observa superplasticidad. Como se indica en la figura (a), incrementos en la temperatura o disminuciones en el tamaño de grano cambiará la curva σ - $\dot{\epsilon}$ en dirección hacia abajo y a la derecha. Los mismos cambios producen un valor de m algo mayor, como se muestra en la figura (b).

Las velocidades de deformación a las cuales se observa normalmente la superplasticidad se encuentran entre 10^5 y 10^{-1} $1/s.$, aunque es más usual encontrarlas entre 2×10^{-4} y 2×10^{-3} $1/s.$ Estas velocidades de deformación son menores que las usadas en los procesos convencionales de deformación en caliente.

Recientemente, la superplasticidad ha sido reportada a velocidades de deformación mayores que 1 $1/s.$, lográndose elongaciones de hasta 1000% a velocidades de deformación que se acercan a 10^2 $1/s.$ en aleaciones mecánicas de aluminio, y cerca de 500% a velocidades de deformación de 10 a 50 $1/s.$ en composites a base de aluminio. En cada uno de los casos anteriores, y en otros, la deformación se llevó a

cabo a temperaturas justo por debajo de la línea de solidus y hay evidencia que sugiere que la alta velocidad de deformación usada dio como resultado el calentamiento de la muestra de tal forma que la temperatura se elevó justo por encima de la línea de solidus, y ocurrió una fusión parcial en el límite de grano, permitiendo que el acomodo del flujo superplástico ocurriera en una capa líquida.

Si la relación entre esfuerzo σ y velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$, se mide y se grafica logarítmicamente, se obtiene una curva sigmoideal (ver figura 1.6). Esta gráfica puede ser dividida en tres regiones. Las pendientes de la curva de la gráfica son iguales a la sensibilidad a la velocidad de deformación del esfuerzo a la fluencia m , dada por la ecuación 2.2, y la cual cambia con la velocidad de deformación. En la práctica, muchos materiales superplásticos muestran una variación sigmoideal del esfuerzo a la fluencia con respecto a la velocidad de deformación y de aquí que la sensibilidad a la velocidad de deformación pase por un máximo de entre 0.6 y 1.0. Un valor de m mayor a 0.4 delinea el régimen superplástico, el cual encontramos en la región II. Ambos rangos de velocidades de deformación (el alto y el bajo) presentan valores para m de 0.1 a 0.4.

$$m = \frac{\delta \log \sigma}{\delta \log \dot{\epsilon}} \dots \dots \dots (1.2)$$

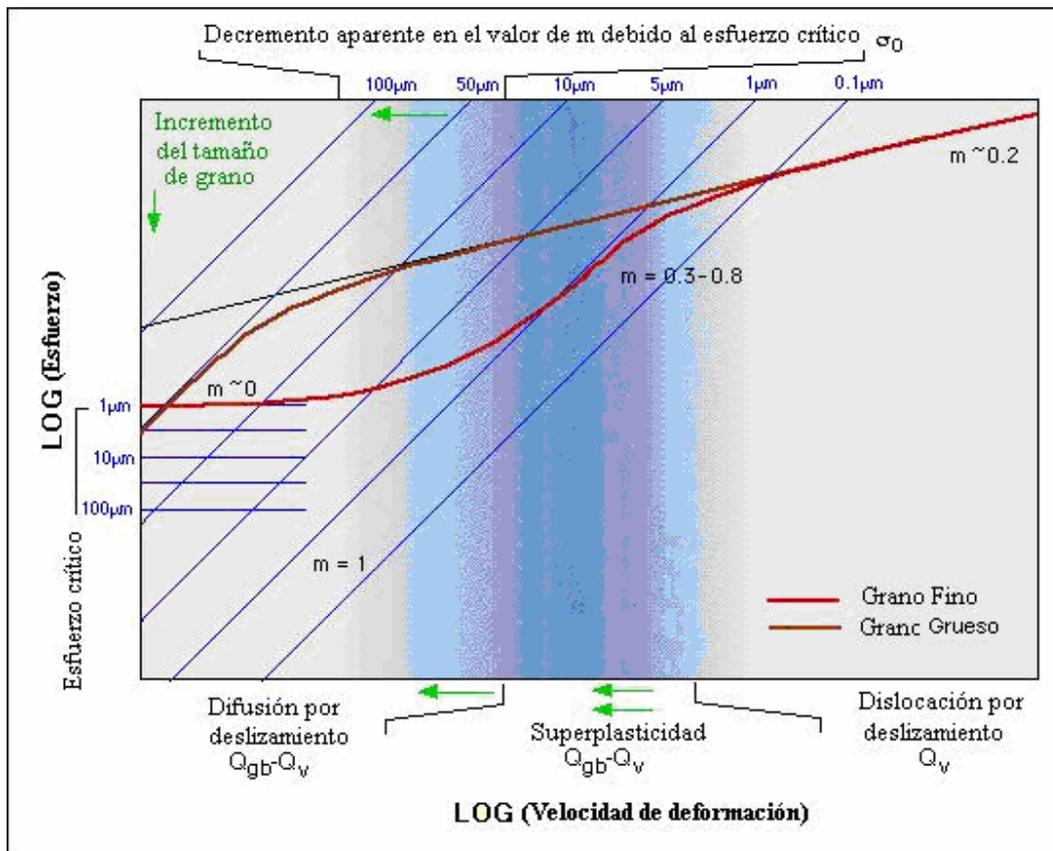


Figura 1.6.- Gráfica logarítmica de la relación entre esfuerzo σ y velocidad de deformación $\dot{\epsilon}$,

1.4.1.- REGIÓN DE FLUJO SUPERPLÁSTICO.

A velocidades de deformación intermedias (región II), donde el material se deforma superplásticamente y se observan grandes cantidades de deformación uniforme; todavía no está totalmente entendida, la manera en la que ocurre el proceso de deformación, y aún mediante estudios experimentales no se ha podido identificar un mecanismo único de control de velocidad para tal. Sin embargo, hay un acuerdo en las características microestructurales asociado a este. La deformación es acumulada por el movimiento relativo de granos individuales o de grupos de granos con respecto a los demás, sucediendo esto mediante deslizamiento y giro de estos. De modo que, el deslizamiento del límite de grano y la rotación del grano son los principales contribuyentes de la deformación total. En esta región se observa que los granos cambian sus alrededores y emergen a la superficie libre desde el interior. Durante la

deformación los granos permanecen equi-axiales, y si no se encuentran equi-axiales antes de la deformación, se vuelven equi-axiales durante el flujo superplástico. Las texturas se vuelven menos intensas como resultado de la deformación en esta región. El movimiento de granos individuales depende tanto de los esfuerzos normales como cortantes, que actúan en los límites de grano, y por lo tanto es dependiente de la forma y la orientación de los granos. De este modo, la translación y rotación son estequiométricos (dependen de las proporciones de los componentes químicos de la aleación) por naturaleza, ocurriendo en diferentes direcciones, a diferentes grados y en diferentes ubicaciones.

En esta región, la sensibilidad a la velocidad de deformación es alta ($m > 0.5$). La energía de activación medida para el flujo en la región II es frecuentemente similar a la de difusión del límite de grano y el esfuerzo a la fluencia es dependiente del tamaño del grano. En contraste con las otras regiones, aquí, los granos conservan su estructura equiaxial ultrafina a pesar de la deformación y los materiales que inicialmente presentaban grupos microestructurales, desarrollan una microestructura equiaxial mas uniforme. La capacidad de mantener una estructura de grano equiaxial depende de la movilidad de la interfase y del agrandamiento por deslizamiento del límite de grano. El papel más importante en la deformación superplástica lo juega el efecto del deslizamiento y la migración del límite de grano. Durante la deformación superplástica ocurren cambios considerables en la textura de una aleación que son el resultado de esfuerzos acumulados por deslizamiento, gran deslizamiento del límite de grano, movimientos de dislocaciones, procesos de difusión y recristalización. Esta textura cristalográfica puede reducirse durante la deformación en esta región. Aumentar las dislocaciones causadas por una supersaturación de vacantes intersticiales producidas por el cambio de fases α - β contribuye a la deformación superplástica. Aunque el deslizamiento interfacial es la principal causa de la deformación superplástica, también puede dar surgimiento a la

cavitación. Cabe mencionar que la superplasticidad no se observa en los regímenes I y III en los cuales la sensibilidad a la velocidad de deformación es baja.

Estudios de microscopia de transmisión de electrones han mostrado únicamente evidencia limitada de actividad de dislocación dentro de los granos de los materiales deformados superplasticamente.

En las regiones de alta y baja velocidad de deformación, (regiones III y I respectivamente), la sensibilidad de velocidad de deformación es baja ($m=0.2$ a 0.3). En la región III, la deformación se acumula por el deslizamiento de las dislocaciones dentro de los granos. El movimiento de estas dislocaciones es impuesto por la microestructura del material. La textura cristalográfica dentro del material se incrementa y ocurren elongaciones de grano significativas durante la deformación. La energía de activación para la fluencia en esta región, es similar a la de difusión del arreglo, y la velocidad de deformación es relativamente insensible al tamaño del grano.

El origen del régimen de baja velocidad de deformación (régimen I), es hasta el momento desconocido. La evidencia experimental disponible es un tanto limitada, y a veces contradictoria. Ha sido sugerido que el descenso en la sensibilidad a la velocidad de deformación, con la velocidad de deformación es solo aparente y resulta de un esfuerzo crítico de deformación, o de los efectos de inestabilidad microestructural (endurecimiento por crecimiento del grano). Otras investigaciones experimentales, también han mostrado que a una velocidad de deformación baja, la sensibilidad de velocidad de deformación puede incrementarse, tomando valores cercanos a la unidad.

CAPITULO 2

MODELOS DE DEFORMACIÓN SUPERPLÁSTICA.

La forma clásica en la que un metal se deforma plásticamente, es por medio del deslizamiento de planos atómicos uno sobre otro, tal como si fueran cartas de una baraja. La fuerza necesaria para que ocurra este deslizamiento, debe ser la requerida para vencer los enlaces atómicos que unen un plano con otro. Sin embargo, existen defectos en la estructura cristalina, los cuales mueven a los átomos de su posición de equilibrio; con esto, basta con aplicar tan solo una pequeña fuerza para que ocurra un deslizamiento de un plano sobre otro. A estos defectos se les conoce como dislocaciones. Los mecanismos normales de deformación basados en dislocaciones no permitirían la superplasticidad, ya que ésta se caracteriza por no generar endurecimiento en el metal al deformarse, efecto que si sucede en los metales normales.

Muchos de los esfuerzos hechos para encontrar un mecanismo que explique la superplasticidad involucran el acomodo del límite de grano por deslizamiento. Aquí, la deformación ocurre por deslizamiento de granos sobre granos, en lugar de planos atómicos sobre planos atómicos. Como con la deformación por tensión, el acomodo por deslizamiento en el límite de grano se lleva a cabo mediante flujo por difusión y/o, por mecanismos básicos de dislocación.

Al parecer, en la deformación superplástica, la materia que proviene del interior de la muestra emerge hacia la superficie, creando así una nueva superficie la cual aumenta la longitud de la muestra al disminuir su diámetro. El efecto se repite en un gran número de sitios a lo largo de la superficie, provocando una deformación uniforme a la largo de la muestra sin presencia de endurecimiento por deformación,

ni formación de “cuello” en el cuerpo de la muestra. Observaciones hechas con un microscopio electrónico en pruebas “in situ” a muestras de la aleación Zn-22Al-2Cu (% en peso) muestran que durante la deformación, algunos granos grandes de zinc son destrozados durante la deformación y nuevo material emerge a la superficie a llenar el hueco. Aquí se observan algunas bandas de deslizamiento en unos cuantos granos de zinc, formando un ángulo de 45° con respecto al eje de tensión. La microscopía por transmisión de electrones de los especímenes deformados, permite concluir que algunos granos duros de aluminio rompen granos de zinc y aluminio durante la deformación. De esta manera, los granos de aluminio pueden sobrepasar otros granos durante la deformación. Al chocar los granos de aluminio con los granos de zinc, producen una concentración de esfuerzos en el punto de contacto, esta, induce un sublímite de grano en el grano impactado; en otros casos el grano impactado se fractura. Mediante este tipo de mecanismo, un grano duro puede sobrepasar un obstáculo durante la deformación superplástica, la concentración de esfuerzos puede producir tanto la fractura del grano, como la activación de un plano de deslizamiento. Este mecanismo es muy probable que ocurra en las aleaciones de dos fases donde una fase es muy débil (fase rica en Zn) y la otra es una aleación endurecida por precipitados (fase rica en Al).

El mecanismo consiste en crear una superficie durante la deformación a base de materia que emerge del interior del sólido, en regiones que corresponden a intersecciones de granos o grietas formadas en la superficie. Este mecanismo sustituye el alargamiento que sufren los granos en un metal que se deforma exclusivamente por mecanismos de dislocaciones. En el caso antes mencionado, se ha observado la emergencia de material en grietas formadas por granos grandes de zinc; sin embargo, podría suceder en la frontera de los granos del material, que por su finura harían difícil la observación directa del fenómeno. Este mecanismo podría aplicarse también a la deformación a temperaturas altas.

2.1. DESLIZAMIENTO Y DIFUSIÓN DEL LÍMITE DE GRANO.

En la figura 2.1, se observa que se puede tener un desplazamiento cortante de los centros de los granos (ΔS), y por tanto una deformación macroscópica, no solo por deslizamiento a lo largo del grano, sino también por rotación de un ángulo ω en la frontera del grano. Si se llevan a cabo ambos procesos operando simultáneamente, se lograra un mayor desplazamiento cortante de los centros de los granos con menores cantidades de deslizamiento y rotación. Con este desplazamiento (ΔS), se puede lograr una deformación macroscópica ϵ , no solo por el deslizamiento de una distancia x a lo largo del límite del grano, sino también por la rotación de un ángulo ω . Si ambos procesos se logra que actúen simultáneamente, un desplazamiento cortante del centro del grano determinado puede producirse con menores cantidades de rotación y deslizamiento. Por tanto, una determinada rapidez de deformación puede mantenerse para velocidades menores de deslizamiento del límite de grano y de aquí, menores esfuerzos. Más aún, al reducirse el tamaño del grano, para una rapidez de deslizamiento del límite de grano determinada, la rapidez de deformación se incrementara. De este modo, se espera que el deslizamiento en el límite de grano y la deformación superplástica se incremente progresivamente en materiales de granos más finos.

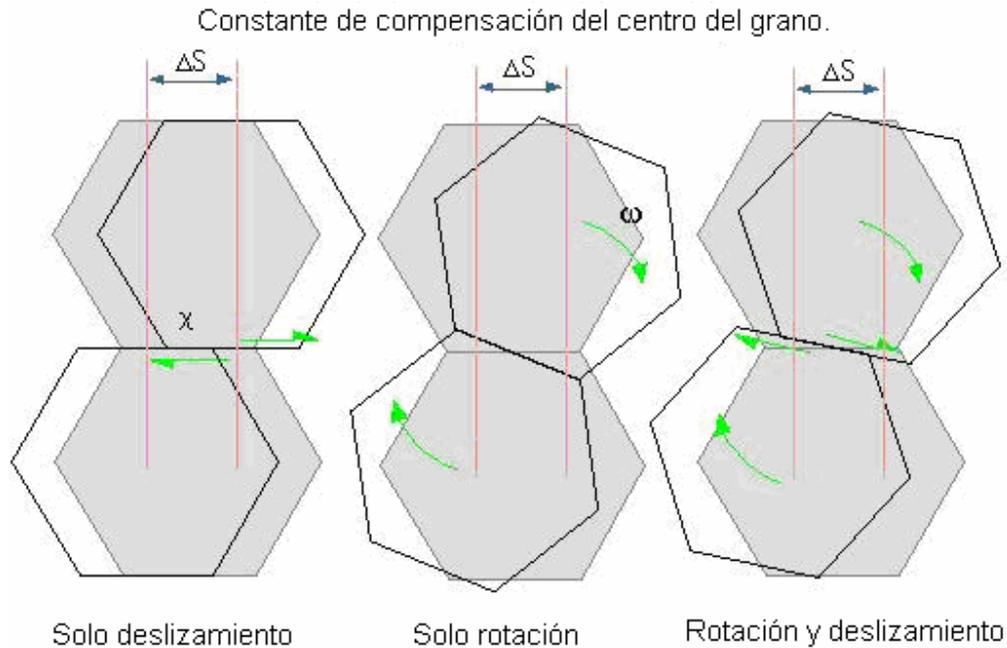


Figura 2.1.- Desplazamiento cortante de los centros de los granos (ΔS)

El fenómeno del deslizamiento en el límite de grano es importante. De hecho, se cree que la superplasticidad ocurre en gran parte por el deslizamiento en el límite del grano, dado que mediante este proceso, se evita la formación de micro grietas o micro huecos en la microestructura, debidos a la transferencia de masa asociada con la difusión del límite de grano o a la difusión por abultamiento, como sucedería si el deslizamiento en el límite de grano ocurriera en un sistema de granos completamente rígidos. Debido a esto, la rapidez de difusión por deslizamiento, debe estar exactamente balanceada por la rapidez de deslizamiento del límite de grano para evitar que se generen grietas o vacantes, esto se ilustra en la figura 2.2. Aquí, se puede ver que la difusión por deslizamiento y el deslizamiento del límite de grano son procesos secuenciales, y la rapidez del deslizamiento será controlada por el proceso más lento de estos dos, esto es, si los procesos de acomodación son lo suficientemente rápidos a la temperatura de deformación, entonces el deslizamiento del límite de grano puede ser el mecanismo de control de velocidad. Alternativamente, si el

deslizamiento del límite de grano fuese intrínsecamente rápido entonces el proceso de acomodo sería la limitante de la velocidad.

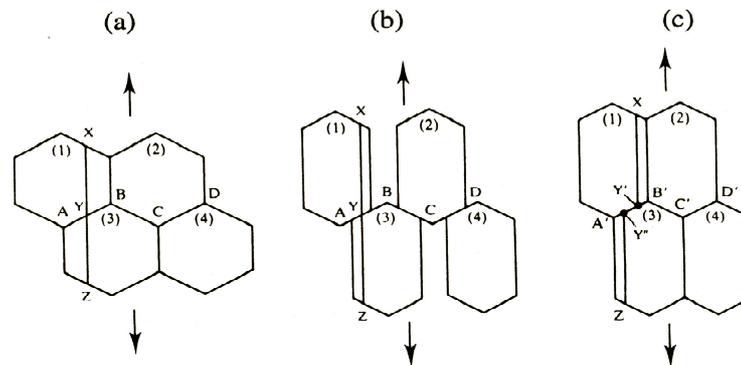


Figura 2.2 (a) cuatro granos en un arreglo hexagonal antes de la deformación por deslizamiento; (b) después de deformarse por deslizamiento por difusión, una dimensión del grano se incrementa y la otra decrece, y se forman “huecos” entre los granos; (c) los huecos son removidos por el deslizamiento del límite de grano. La extensión de el desplazamiento por deslizamiento, es cuantificado por la distancia $Y'Y''$, la cual es el desplazamiento a lo largo de la orilla de los granos 1 y 3 de la línea vertical inscrita originalmente XYZ. [De Evans y Langdon, 1976].

También se ha creído que la masa puede ser redistribuida por un flujo difusional, llevada a cabo por diferencias entre los esfuerzos dependientes del potencial químico en fronteras de los granos adyacentes, en donde ocurriría el transporte de regiones de compresión a regiones de tensión. El acomodo se lleva a cabo por deslizamiento, el cual conlleva un cambio gradual por difusión en la forma del grano al moverse la materia. La migración de la frontera del grano restaura la forma equiaxial original del grano pero solo en una orientación por rotación. La retención de forma de un grano equiaxial es por tanto lograda en el modelo de Ashby y Verrall. Además, debido a un transitorio pero finito incremento en el área de la frontera de grano, resultado de un cambio en la forma, el modelo predice un esfuerzo inicial para el flujo superplástico.

Ashby y Verall (1973) propusieron el acomodo mediante flujo por difusión. Este usa un mecanismo de cambio del grano para explicar como la forma del grano se preserva durante la deformación superplástica. Esto se ilustra en la figura 2.3

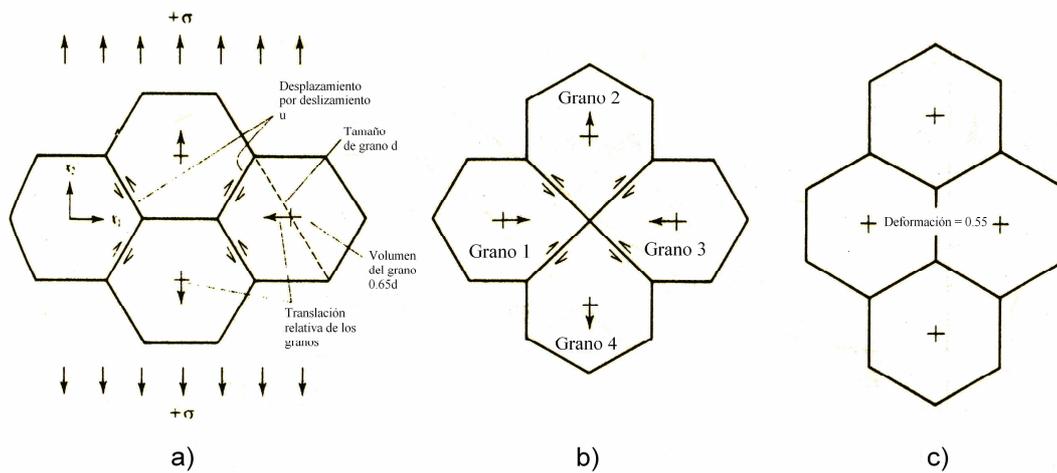


Figura 2.3 Mecanismo del cambio momentáneo del grano (grain switching) de Ashby y Verral: (a) estado inicial; (b) estado intermedio; (c) estado final.

En el modelo de cambio del grano, los granos en estado inicial, figura 2.3 a), pasan a un estado intermedio, en donde hay un incremento de área en el límite del grano (figura 2.3b)). Esto es seguido por un acomodo por difusión de cambio en la forma en la fase intermedia mediante abultamiento o por difusión del límite de grano (figura 2.4).

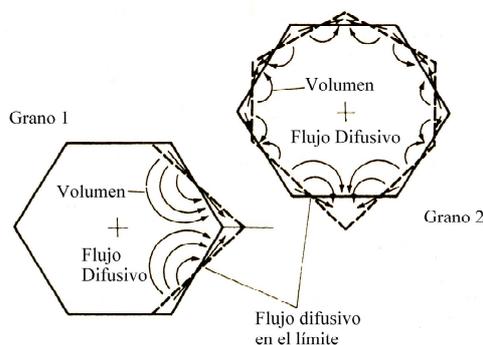


Figura 2.4 Acomodo del estado intermedio en el cambio momentáneo del grano (grain switching) por abultamiento y difusión del límite de grano.

Los mecanismos de difusión por abultamiento y de difusión del límite de grano se esquematizan en las figuras 2.5 y 2.6 respectivamente. El mecanismo de abultamiento del grano involucra un flujo de vacantes que producen un incremento neto de longitud en la dirección del esfuerzo de tensión aplicado, o una disminución de longitud en la dirección del esfuerzo de compresión. Dado que el esfuerzo aplicado excede el esfuerzo inicial requerido para la interrupción del grano, la velocidad de deformación para la interrupción del grano es considerablemente más grande que el requerido para la fluencia convencional.

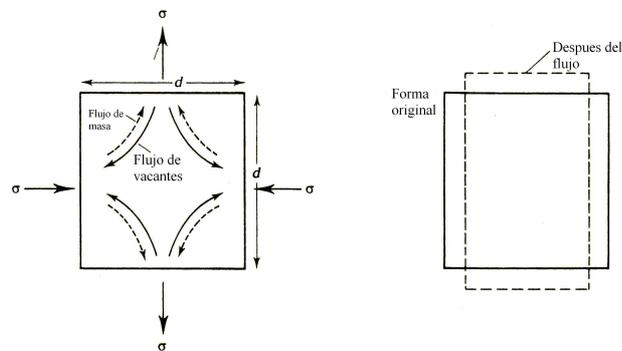


Figura 2.5 Ilustración esquemática de la difusión por abultamiento [De Courtney (1990) con el permiso de McGraw-Hill.]

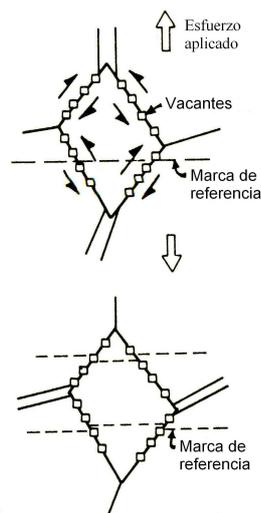


Figura 2.6 Esquemática de la difusión por deslizamiento del límite de grano (Coble). [De Meyers y charla (1998) con permiso de Prentice Hall.]

Gifkins ha señalado que el proceso de cambio del grano propuesto por Ashby & Verral debe ser modificado para tomar en cuenta la modificación del área debido al esfuerzo. El modelo propuesto por Gifkins es un modelo tridimensional el cual se ajusta a las observaciones hechas sobre la nueva superficie, la cual se crea durante la extensión del espécimen, pero el tamaño de grano permanece sin cambio. Un nuevo grupo de granos deslizantes adyacentes, abrirían una fisura en la superficie libre, al tiempo que la deformación continúa, nuevos granos emergen a la superficie para llenar los huecos. La migración del límite de grano ocurre al mismo tiempo que los granos emergen, para restaurar los ángulos diedros del límite del grano; esto da como resultado el redondeo de los granos que emergen y la curvatura de todos los otros límites de granos, el proceso es muy regenerativo para lograr grandes elongaciones.

Además, el acomodo de forma puede también ocurrir por el movimiento de la dislocación. De cualquier manera, ya que la actividad concentrada de dislocaciones generalmente no es observada durante la deformación superplástica, esta puede ocurrir como si fuera un mecanismo tradicional. Además, el proceso de movimiento-escalamiento de la dislocación (figura 1.13) (glide-climb), puede ocurrir adicionalmente al abultamiento del grano o al proceso de difusión del límite de grano, que preserva la forma durante la deformación superplástica.

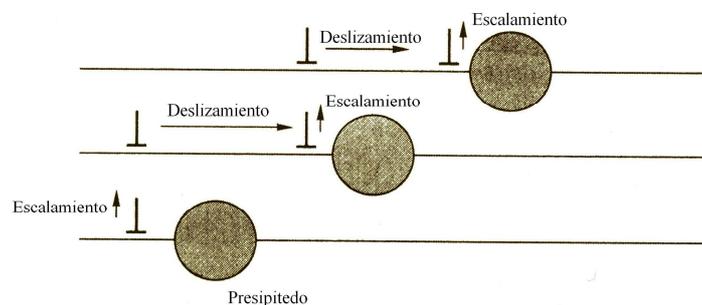


Figura 2.7 Ilustración esquemática del proceso de deslizamiento y escalamiento de las dislocaciones [De Ashby y Jones (1996) con permiso de Butterworth-Heinemann.]

Frecuentemente, se asume que el deslizamiento del límite de grano ocurre como resultado del esfuerzo aplicado, y que el esfuerzo transitorio generado como consecuencia del intento de los granos por deslizarse se detiene por el re-arreglo físico de la materia. Siendo la rapidez a la cual se lleva a cabo este último proceso, la que se cree que frecuentemente gobierna la velocidad a la cual la deformación se acumula.

Kim et al. (1995) han mostrado, que una alta velocidad de deformación superplástica puede ser explicada por un modelo que es análogo al modelo de deslizamiento del límite de grano de la capa del núcleo (“core mantle”), propuesto originalmente por Gifkins (1976). En este modelo, la camisa corresponde a la cubierta exterior de los subgranos, donde ocurre el acomodo por deslizamiento del límite de grano. Sin embargo, no ocurre deformación en el núcleo interior de los subgranos, los cuales permanecen equiaxiales e invariantes con el esfuerzo.

Desafortunadamente, este mecanismo no explica satisfactoriamente otros hechos, como la forma en que depende la deformación de la rapidez de deformación; esto es, si la aleación se estira muy rápida o lentamente, la deformación total es pequeña. Existe sólo una rapidez de deformación para la cual esta es máxima. Este tipo de comportamiento sugiere el concurso de dos mecanismos antagónicos que alcanzan un equilibrio en el valor $\dot{\epsilon}$.

2.2 MODELOS DE DISLOCACIÓN.

Cuando el límite de grano se desliza, se desarrollan concentraciones de esfuerzos por todas partes en donde el deslizamiento se ve obstruido. La liberación de las concentraciones de esfuerzos mediante la emisión de dislocaciones de una frontera de grano y sus absorciones por otra frontera de grano puede ser limitada por la

velocidad a la cual las dislocaciones son emitidas (fuente de control), por la velocidad a la cual las dislocaciones pueden cruzar los granos (control del deslizamiento o del escalamiento del arreglo) o por la velocidad a la cual las dislocaciones son absorbidas dentro de las fronteras (control de escalamiento de la frontera de grano).

Se ha asumido que el proceso de deslizamiento ocurre relativamente rápido en la superplasticidad debido a que hay una carencia de obstáculos fortalecedores o significantes efectos de arrastre de soluto dentro de los granos a la temperatura de deformación. Se cree que el choque de dislocaciones adyacentes a las fronteras de los granos desarrollan y proveen un esfuerzo de retroceso, contrario al cual el deslizamiento del grano tendría que trabajar para emitir posteriores dislocaciones a lo largo de un plano de deslizamiento particular.

El escalamiento de las dislocaciones guías del choque dentro de la frontera permitiría que otras dislocaciones fueran emitidas y que estas permitieran un pequeño incremento del deslizamiento de la frontera de grano que se acumulen. Al permitir al borde de la frontera de grano actuar como fuente de dislocación, la magnitud absoluta de la velocidad de deformación predicha puede variar.

Una alternativa al acomodo por flujo de dislocación surge si el deslizamiento de la frontera de grano es acomodado por el movimiento-escalamiento de la dislocación dentro de la frontera de grano. Los choques entre las dislocaciones de la frontera del grano pueden formarse en las fronteras de los granos como puntos triples. Aquí, la velocidad de control del proceso podría estar dada, por dislocaciones hechas por la dislocación primaria dentro tanto del arreglo de red, como en la frontera, las cuales pudieran crear grietas en otras fronteras intersectando el punto triple.

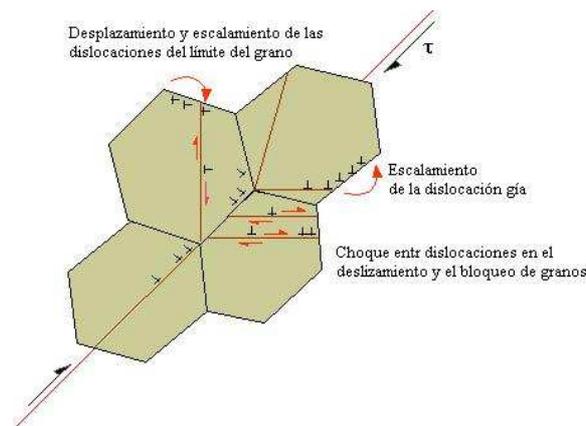


Figura 2.8

Si la rotación del grano fuera aceptada como resultado de un sistema no balanceado de frontera de grano sometida a esfuerzos cortantes, entonces, no se observaría elongación del grano. Variaciones aleatorias en la dirección y magnitud de la rotación causarían un cambio de deslizamiento de un sistema de deslizamiento a otro. Como la rotación puede ser mayor de 30° , no sería aparente un cambio neto en la forma del grano.

Por otro lado, la rotación del grano sería una característica implícita del modelo de dislocación de la frontera del grano. De nuevo, el esfuerzo cortante que actúa en las fronteras del grano debería ser capaz de mover las dislocaciones causando una torsión dentro de la zona frontera. El torque resultante en los granos debería reorientar la red cristalina del grano y se observaría movimiento oscilatorio del grano.

Chen ha propuesto un modelo de mecanismo continuo de flujo superplástico basado en las teorías de transformación plástica de Eshelby. Se asume que un evento de cambio de grano similar al representado por Ashby y Verrall y otros fue el paso que produjo la deformación, pero que estos eventos ocurren de manera azarosa en lugar de simultáneamente en todos los puntos dentro de la microestructura. Fue asumido

que los eventos de cambio de grano no solo ocurren de manera aleatoria en espacio y tiempo, si no también con respecto a la dirección del flujo plástico. Ya que los eventos de cambio de grano fueron totalmente aleatorios, después de una repetición determinada de los eventos, no habría deformación neta, debido a que se cancelarían los efectos entre ellos mismos. De cualquier modo, siguiendo cada cambio de evento, los granos re-orientados aún tendrían que alcanzar dentro de las locaciones originales. Para acomodarse los granos ya cambiados, en su nueva configuración, una gran cantidad de deformaciones localizadas se desarrollarían en los alrededores de la matriz. Las deformaciones locales se eliminarán por el flujo plástico entre el cuerpo del material, y las direcciones de dichas eliminaciones de esfuerzo estarían basadas en el esfuerzo aplicado en la dirección del flujo macroscópico. La deformación local, generada por el evento de cambio de grano, se volvería a redistribuir y desaparecería, pero causaría un desplazamiento muy pequeño en las superficies exteriores del material en la dirección del flujo. La eliminación de esfuerzos locales producida por los subsecuentes eventos de cambio del grano, indiferente a su orientación, contribuirían un poco al flujo en la dirección del esfuerzo aplicado.

La interpretación continua no considera el detallado mecanismo del proceso de cambio de grano, debido a que la transformación por si misma no controla la rapidez a la cual se acumula la deformación macroscópica. Ya que la deformación microscópica se acumula solo a lo largo del rango de la eliminación de las deformaciones (o de los esfuerzos) generados por el evento del cambio, entonces la orientación de esos eventos es irrelevante. El cambio de grano puede ocurrir repetidamente hacia delante y hacia atrás en el mismo punto dentro de la microestructura y cada vez generar una pequeña deformación en la dirección del flujo plástico. El modelo, por lo tanto no sufre de las mismas restricciones de las que sufre el modelo de Ashby & Verrall y el de Spingarn & Nix.

Evidencia de lo que se ha venido conociendo como micro-multiplicidad, ha sido provista por estudios in-situ de deformación superplástica, donde se ha observado que el proceso de deformación es altamente heterogéneo. En este proceso, muchos mecanismos de deformación aparentarían operar simultáneamente o de forma secuencial dentro de diferentes regiones de la microestructura. Desde luego, este provee como una explicación de la superplasticidad, una razón relativamente simple para las amplias divergencias en los valores reportados de sensibilidad a la rapidez de deformación, y energías de activación. De cualquier modo, el desarrollar un concepto dentro de una teoría totalmente cuantitativa del flujo superplástico sería excesivamente complejo.

2.3.- SUPERPLASTICIDAD A TEMPERATURA AMBIENTE.

A temperatura ambiente la difusión es muy baja, al contrario de lo supuesto en el modelo propuesto para la superplasticidad a temperaturas altas. Al parecer el movimiento de los granos en su trayectoria hacia la superficie o en cualquier otra dirección, no se ve obstaculizado por otro grano, ya que un grano puede atravesar a otro concentrando su carga en un punto. Esta concentración de esfuerzos se libera con la formación de una subfrontera de grano, a través de la cual el cristal se fractura o desliza por el movimiento de las dislocaciones, dividiéndose en dos y permitiendo el paso del grano en movimiento. Cuando el cristal, que sirve de obstáculo, es de zinc y tiene una orientación adecuada (planos compactos haciendo un ángulo cercano a 45° con el eje de tensión) puede dejar el paso del grano en movimiento, deformándose plásticamente. En cualquier caso, el grano duro sobrepasara el obstáculo produciendo refinamiento de grano. Algunos cristales de la superficie se deforman plásticamente, por la presencia de huellas de deslizamiento en forma de líneas que aparecen después de iniciada la deformación. Sin embargo, estos cristales deformados plásticamente, que deberían aparecer con una alta

densidad de dislocaciones, no se encuentran. En el caso de la aleación Zn-22Al-2Cu (% en peso), esto podría deberse a que la temperatura de recristalización del zinc es inferior a la temperatura ambiente, con lo cual los granos sufren recristalización inmediatamente después de ser deformados, liberándose así de la mayor parte de las dislocaciones generadas por la deformación. Sin embargo las huellas superficiales no pueden ser eliminadas y son observadas en la superficie de los granos haciendo un ángulo cercano a 45° con el eje de tensión, lo cual coincide con la posición del máximo esfuerzo cortante generado por el esfuerzo de tensión aplicado.

En las regiones donde los granos se mueven por deslizamiento del límite de grano o por grietas originadas dentro de la fase más frágil o producidas por impurezas, puede localizarse la iniciación de una fisura. El material, que llena estas fisuras entre los granos, no es un solo grano como fue propuesto originalmente por Gifkins, si no que es un conglomerado de granos finos que se mueven a la superficie.

Una teoría formal de la superplasticidad aún no esta disponible. Se ha propuesto un nuevo mecanismo, el cual es un modelo tridimensional que se ajusta a las observaciones de la creación de nuevas superficies durante la extensión del espécimen, pero con un tamaño de grano, el cual permanece siempre sin cambios. Un grupo de granos que se deslizan adyacentemente abrirían una fisura en la superficie que se llenaría con material que emerge de la capa de la superficie inferior. Sin embargo, todo parece indicar que no hay un solo proceso que puede explicar completamente los aspectos mecánicos del flujo superplástico. El flujo superplástico, ni siquiera se puede explicar por los aspectos topológicos, a saber, el mantener una forma de grano equiaxial, una rotación del grano o una traslación. Intuitivamente, esto sería lo que se esperaría debido a que muchos procesos están operando simultáneamente dentro de una microestructura la cual esta lejos de ser

uniforme. No obstante, se ha demostrado que el deslizamiento de la frontera del grano se vuelve más significativa en materiales de grano mas fino.

2.4.- CAVITACIÓN

A la formación de huecos o cavidades, se le conoce como cavitación. Esta es causada por incompatibilidad de deformación de los granos adyacentes, que pueden conducir a la formación de microhuecos; o por la localización de flujo a lo largo del grano y entre los límites de las fases en el proceso de deslizamiento. Como el deslizamiento puede ser bloqueado con varias irregularidades pero más efectivamente por partículas duras que actúen como elevadores de la concentración de esfuerzos, esto puede llevar a la formación de grietas que pueden producir pequeñas vacantes íter granulares. La cavitación se presenta bajo la acción combinada de esfuerzos y el deslizamiento de los límites de grano. A pesar de esto, muchos materiales superplásticos no cavitan. Aún cuando se observan huecos en materiales superplásticos, su distribución de estos esta lejos de ser homogénea, además estos se acomodarían al deslizarse los granos. La cavitación no es propiamente un mecanismo de acomodo, si no más bien es una actividad de difusión o dislocación.

La cavitación en los límites de grano, es uno de los mayores problemas en el conformado superplástico. Esto, da cómo resultado un deterioro de las propiedades mecánicas de las partes conformadas superplasticamente y por tanto una temprana fractura. La cavitación, puede limitar la ductilidad superplástica del material, así como, reducir las propiedades mecánicas finales de los componentes formados por operaciones de conformado superplástico.

2.5. CONFORMADO SUPERPLÁSTICO.

Debido a sus características el conformado superplástico es ideal para la producción de piezas complejas que de otra manera sería difícil de darles forma, gastando un mínimo de energía y evitando usar maquinaria costosa, logrando importantes ahorros de producción. Las partes formadas superplasticamente tienen muchos usos, particularmente en proyectos aeroespaciales, donde las técnicas de conformado superplástico están siendo cada vez mas usadas para el conformado de propulsores complejos y partes del fuselaje. El conformado superplástico de aleaciones a base de níquel ha sido usado para formar discos de turbinas con alabes integrados, mientras que el conformado superplástico de aleaciones de titanio se utilizan para producir ventiladores y alabes de compresores para motores aéreos. Por otra parte, las aleaciones de aluminio pueden emplearse en la fabricación de superficies de control, en la estructura del avión y en pequeños elementos estructurales a escala, donde se requieren pesos bajos y alta rigidez. Algunas otras aplicaciones no aeroespaciales de aleaciones de aluminio pueden ser: contenedores con perfiles de superficies complejas, paneles decorativos para cubiertas internas y externas de construcciones.

Las relativamente bajas velocidades de deformación que se usan en el conformado superplástico dan como resultado velocidades bajas de producción y por lo tanto altos costos, pudiendo ser este un serio problema. No obstante, es importante hacer notar que el refinamiento del grano ha sido propuesto como un método para alcanzar altas velocidades de deformación durante el conformado superplástico.

Algunos investigadores han mostrado que una alta velocidad de deformación en el conformado superplástico puede lograrse mediante un refinamiento microestructural con tamaño de grano de $\sim 1 \mu\text{m}$. o menor. La presencia de una alta velocidad de deformación superplástica en aleaciones de grano fino, tiene bastantes aplicaciones para la manufactura de partes mediante conformado superplástico con altos índices de producción. Es probable que el realce en los índices de producción se

incrementarán mas adelante, cuando mejoras en las técnicas sean desarrolladas para los procesos de materiales con granos de tamaño nanométrico y sub-micrométrico.

2.6.- REFINAMIENTO DEL GRANO.

Está bien establecido que es un pre-requisito esencial tener un tamaño fino de grano para que se presente la superplasticidad. Por lo que un entendimiento de los principios básicos de la metalurgia sobre el refinamiento del grano y el crecimiento de éste es importante para el desarrollo de la superplasticidad en materiales que normalmente no serían superplásticos. Hay disponibles muchos métodos para el refinamiento del grano entre los que se incluyen la separación de fases, la transformación de fases y el trabajo mecánico con recristalización. Aunque, debería ser posible en principio desarrollar una microestructura de grano fino usando únicamente tratamientos térmicos.

Es muy posible darle un recocido a un material de dos fases, a una temperatura en donde solo una fase sea estable. Mediante un templado, se llevara a cabo una transformación martensítica o una solución sólida supersaturada en la estructura resultante de fase simple. Un recocido subsiguiente resultara en la separación de las dos fases en equilibrio de la microestructura metaestable. Si están disponibles suficientes sitios de nucleación, se producirá una microestructura de grano fino. Un ejemplo de refinamiento de grano por este método (separación de fases) es la del Zn-22%Al. Un enfriamiento lento de la aleación Zn-Al resultará en un producto de descomposición laminar eutectoide con muy pocas propiedades superplásticas. Si de cualquier manera, la aleación es templada a temperatura ambiente, una solución sólida supersaturada de Al en el Zn se formará, produciendo un grano muy fino, altamente superplástico.

A pesar de la amplia variedad de métodos disponibles para desarrollar una microestructura de grano fino, solo una pequeña fracción de algo más de 100 aleaciones diferentes, y que muestran superplasticidad son o tienen el potencial de ser explotadas comercialmente. Entre estas se incluyen aleaciones de aluminio endurecidas mediana o altamente, algunas aleaciones duplex de titanio y aceros inoxidable con gran contenido de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- *Gabriel Torres Villaseñor, “Superplasticidad y superelasticidad en aleaciones metálicas” Ciencia, 1982, No. 33, págs. 135-144.*
- 2.- *<http://132.248.45.5/secss/docs/tesisfe/SampereLJC/segunda.pdf>*
- 3.- *<http://www.gpm2.inpg.fr/axes/plast/SuperPlast/superplastuk.html>*
- 4.- *<http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/sp/>*
- 5.- *http://www.imsp.da.ru/English/super_eng.html*
- 6.- *<http://www.ntu.edu.sg/mae/research/researchnews/adv-materials.pdf>*
- 7.- *<http://www.matsceng.ohio-state.edu/~daehn/carroll/>*
- 8.- *<http://www.answers.com/topic/superplasticity>*
- 9.- *http://www.mfg.uky.edu/c4m/publications/advman/advman15_1/marwan.html*
- 10.- *<http://www.stormingmedia.us/keywords/superplasticity.html>*