



Rolado en frío y tratamiento térmico de recocido en aceros bajo carbono

Manuel Alejandro Sánchez Alonso
Jesús Emilio Camporredondo Saucedo
Laura Guadalupe Castruita Ávila*
Facultad de Ciencias Químicas UAdeC

*Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica UAdeC

Introducción

En tiempos recientes ha incrementado el interés y los esfuerzos enfocados a comprender el comportamiento mecánico que presentan las láminas de acero sometidas a trabajos de rolado en frío con un posterior tratamiento térmico de recocido debido a su gran utilidad en múltiples ramas de la industria tales como la automotriz, envases de conserva, etc.

Los aceros con bajo contenido de carbono, que van desde 0.03% a 0.08%, rolados en frío y tratados térmicamente presentan las propiedades ideales para este tipo de aplicaciones.

Tanto las carrocerías de automóviles como envases o latas de conserva utilizan estos aceros con espesores menores a 50 milésimas de pulgada, esto con el fin de hacer componentes más ligeros, pero a la vez resis-

tentes para recibir trabajos posteriores de troquelado profundo y estampado.

Existe un especial interés en optimizar las condiciones de dichos procesos ya que el avance tecnológico y la competitividad de mercado demanda láminas con espesores cada vez más delgados, pero sin detrimento de las propiedades mecánicas.

Se desea encontrar los parámetros de operación tomando en cuenta cada una de las variables implícitas en los procesos como son porcentaje de reducción de la lámina, temperatura de tratamiento térmico de recocido, tiempo de empape de temperatura crítica, velocidad de enfriamiento del material, que nos lleven a encontrar propiedades mecánicas en los aceros que sean propias para fabricar productos terminados con alta



calidad superficial y alta resistencia al ser puestos en operación.

Clasificación de los aceros

Los aceros son las aleaciones metálicas más importantes y más utilizadas por sus buenas propiedades, como gran plasticidad y maleabilidad a elevadas temperaturas, alta resistencia al desgaste, etc, (Wojcik, Jozef et al. 2007).

El AISI (*American Iron and Steel Institute*) y el SAE (*Society of Automotive Engineers*) tienen sistemas para clasificar los aceros utilizando un número de cuatro o cinco dígitos. Los dos primeros se refieren a los principales elementos de aleación presentes y los últimos dos o tres se refiere al porcentaje de carbono. Un acero AISI 1006 es un acero bajo carbono y contiene 0.060% C (Askeland, 1998).

La mayor parte de todo el acero fabricado es bajo en carbono, este tipo de acero contiene menos del 0.25% C. La microestructura presente en esta familia de acero está compuesta por una matriz ferrítica con perlita puntual. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad; además, son de fácil mecanizado, soldables y baratos. Se utilizan para fabricar carrocerías de automóviles, vigas y láminas

para construir tuberías, edificios puentes y latas estañadas (W. Callister, 1996).

Aplicación del acero AISI 1006

Estos aceros han tenido un singular suceso en aplicaciones de troquelado profundo. Su uso extensivo se debe a dos factores principales: primero, cuando son correctamente procesados no presentan punto de cedencia y son comercialmente muy aceptables; segundo, soportan esfuerzos severos en operaciones de formado, conseguido a una estructura de grano elongado tipo *pancake*. La producción comercial de estos materiales ha alcanzado un estado considerable de competencia técnica pero aún existe controversia sobre los factores principales en el mejoramiento de troquelabilidad.

Algunas de las aplicaciones típicas abarcan desde el sector automotriz, línea blanca y metal mecánica. Dentro de este grupo tenemos al grupo de fabricantes dedicados a la manufactura de bisagras, cerraduras, chapas, etc., productos en los que es muy importante la troquelabilidad del material y las tolerancias cerradas dimensionalmente (O. Villarreal, 2002).



Trabajo plástico del acero

El trabajo plástico del acero es la deformación permanente acompañada por la aplicación de fuerzas mecánicas a la superficie del metal. El objetivo principal es producir una forma o tamaño específico, aunque en algunos casos pueden mejorarse las propiedades físicas del metal (tratamientos termomecánicas).

El estudio de la deformación plástica se ha realizado de dos maneras. La primera, llamada microscopía, concierne a una explicación física de plasticidad. Sus consideraciones son, por ejemplo, la relación del comportamiento plástico de la estructura cristalina y las fuerzas interatómicas, factores que son importantes en el diseño de materiales con mejores propiedades plásticas. La segunda forma de deformación plástica es un proceso macroscópico, tiene que ver más con una explicación fenomenológica de plasticidad. Aquí se considera la relación existente de plasticidad a los esfuerzos aplicados, factores que son importantes en el diseño de procesos de formado de metales, y en el diseño de estructuras y máquinas.

El estudio de la deformación plástica, dentro de este punto de vista, puede ser convincente si se subdivide en dos áreas: *trabajo en frío* y *trabajo en caliente*. En el segundo las fuerzas requeridas para deformar el metal son sensibles a los rangos de aplicación de cargas y a las variaciones de

temperatura, pero las propiedades mecánicas del metal después de la deformación permanecen esencialmente sin cambio. En el trabajo en frío, las fuerzas son insensibles a los rangos de aplicación de cargas y sin variación de temperaturas, pero las propiedades mecánicas del metal se incrementan permanentemente (*O. Villarreal, 2002*).

Se obtiene el endurecimiento por deformación de un material incrementando el número de dislocaciones. Cuando se aplica un esfuerzo mayor al límite elástico, las dislocaciones empiezan a deslizarse. Finalmente, una dislocación moviéndose sobre su plano de deslizamiento encontrara un obstáculo que sujeta la línea de dislocación (*D. Askeland, 1998*).

Rolado en frío del acero

Antes de ser procesado por los molinos de reducción, el acero tiene que ser decapado para eliminar el óxido de la superficie de la lámina. Esto se realiza haciendo pasar la cinta de acero por una serie de tanques con ácido cuyas concentraciones oscilan entre el 5 y 16% a una temperatura que va de 80 a 90°C, para posteriormente pasarla por una serie de rodillos exprimidores que tienen la función eliminar el exceso del ácido de la superficie de la lámina; luego se pasa por una sección de enjuague, normalmente agua de ósmosis, y finalmente se seca la superficie de la lámina



con aire caliente para evitar que salga con humedad en la superficie. La lámina, al final del proceso de decapado, se enrolla en un mandril enrollador.

Los molinos de reducción en frío pueden ser de un solo castillo reversible o de varios castillos, éstos se denominan tándem y van de cuatro a cinco castillos.

La reducción en espesor que deberá darse en cada pase de un molino reversible o la laminación en cada castillo de un molino tándem, puede expresarse en términos muy generales. La fuerza de trabajo debe ser distribuida tan uniforme como sea posible en todos los pases, sin caer demasiado por debajo de la máxima capacidad en cualquier pase. El máximo en cada caso está determinado por varios factores: el diseño del molino, potencia disponible, ancho de la cinta, el porcentaje total de la reducción, lubricación de la lámina, sección transversal de la lámina, dureza del acero, rugosidad de la lámina y rugosidad y diámetro de los rodillos de laminación.

Generalmente, el porcentaje más bajo de reducción se da en el último pase para permitir un mejor control en la planeza, calibre y acabado del producto. En los molinos tándem de reducción en frío que se usan en la fabricación de mayoría de los productos laminados en frío, la reducción en cada pase varía entre el 25 y 45% en cualquier castillo,

sin embargo, el pase final puede variar entre el 10 y 30%.

Aunque el proceso de reducción en frío se utiliza para obtener las dimensiones físicas deseadas de la lámina, el proceso no puede alcanzar tal objetivo sin afectar las condiciones metalúrgicas de la lámina que ha sido deformada. Un efecto de mayor importancia es el endurecimiento de la lámina por deformación que incrementa la dureza y ocasiona pérdida de ductilidad del acero.

Durante el proceso de reducción en frío es importante que se controle la variación en el espesor de la lámina ya que tal variabilidad afecta negativamente el desempeño con el cliente final, específicamente en el proceso de estampado de las laminillas utilizadas en la fabricación de productos terminados (*Schindler J. P. et al, 2009*).

Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales se desarrollan durante la deformación. Una pequeña parte del esfuerzo aplicado (quizás aproximadamente el 10%) queda almacenada en el interior de la estructura en forma de una intrincada red de dislocaciones. Los esfuerzos residuales incrementan la energía total de la estructura.

Los esfuerzos residuales no están uniformemente distribuidos en todo el metal deformado. Por ejemplo, puede haber altos esfuerzos residuales a la compresión en la superficie de una placa laminada, mientras en su centro quedan almacenados esfuerzos a la tensión elevados. Si se maquina una pequeña porción del metal superficial de una pieza trabajada en frío, se eliminará metal que sólo contiene esfuerzos residuales a la compresión. Para que el equilibrio se restablezca, la placa tendrá que distorsionarse.

Los esfuerzos residuales también afectan la capacidad de la pieza para soportar una carga. Si se aplica un esfuerzo a la tensión a un material que ya tenga esfuerzos residuales a la tensión, el esfuerzo total actuando sobre la pieza es la suma de los esfuerzos aplicados y residuales. Pero si están almacenados esfuerzos a la compresión en la superficie de una pieza metálica, un esfuerzo a la tensión aplicado primero deberá equilibrar los esfuerzos residuales a la compresión. Ahora la pieza pudiera ser capaz de soportar una carga mayor a la normal (D. Askeland, 1998).

Microestructuras típicas de rolado en frío

La deformación plástica de los metales está comúnmente clasificada como un trabajo en frío (no acompañada de la recristalización) o

como un trabajo en caliente (donde la recristalización ocurre espontánea y simultáneamente a una deformación). Durante la deformación, al alargarse los granos se forma una microestructura fibrosa (O. Villarreal, 2002).

En la figura 1 se muestran las microestructuras típicas cuando un acero se somete a trabajos de rolado en frío.

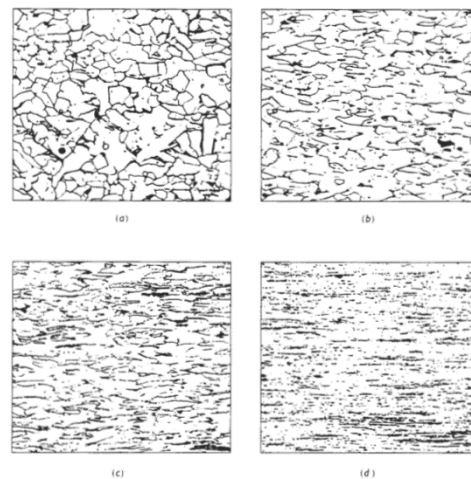


Figura 1. Estructura granular fibrosa de un acero bajo carbono, producida por trabajo en frío: a) 10% de trabajo en frío, b) 30% de trabajo en frío, c) 60 % de trabajo en frío y d) 90% de trabajo en frío (x250). (D. Askeland. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3ª edición, 1998).

Tratamiento térmico de recocido

El recocido es un tratamiento térmico diseñado para eliminar los efectos de trabajo en frío. Puede utilizarse para eliminar totalmente el endurecimiento por deformación conseguido durante el proceso en frío; el componente final será blando y dúctil, pero conservará el terminado superficial y una precisión dimensional satisfactoria. O bien, después del recocido, podría seguir aplicándose trabajo adicional en frío, ya que la ductilidad ha sido restablecida. Combinando ciclos repetidos de trabajo en frío y recocido, se pueden alcanzar grandes deformaciones totales. Finalmente, el recocido a baja temperatura puede utilizarse para eliminar esfuerzos residuales producidos durante el trabajo en frío, sin afectar las propiedades mecánicas de la pieza terminada (D. Askeland, 1998).

Todo proceso de recocido consta de tres etapas:

- Calentamiento a la temperatura prevista.
- Mantenimiento o impregnación térmica a esta temperatura.
- Enfriamiento, generalmente hasta la temperatura ambiente.

En la figura 2 se muestran los diagramas de temperaturas que se lleva a cabo el proceso de recocido.

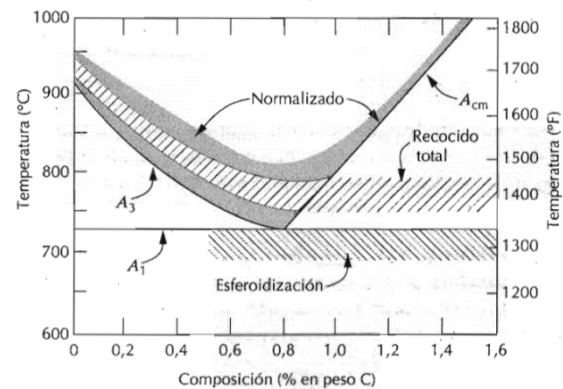


Figura 2. Diagrama de temperaturas donde se lleva a cabo el recocido de acero. (D. Askeland. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 1998).

El tiempo es un parámetro importante en estos procedimientos. Durante el calentamiento y el enfriamiento existen gradientes de temperatura en el interior y la superficie de la pieza; esta magnitud depende del tamaño y la forma de la pieza. Si la velocidad de cambio de temperatura es grande, se genera un gradiente de temperatura que induce tensiones internas que pueden conducir a deformaciones e incluso al agrietamiento. El tiempo de recocido debe ser suficiente para permitir la necesaria reacción de transformación. La temperatura de recocido también es importante; el recocido se acelera al aumentar la temperatura, ya que presenta un proceso de difusión (W. Callister, 1996).



Recocido completo

El tratamiento térmico denominado recocido total se suele aplicar en los aceros medios y bajos en carbono que se han mecanizado o han experimentado gran deformación plástica durante el proceso en frío. El material se calienta de 15 a 40°C por encima de las líneas Ac_3 o Ac_1 . Después se deja enfriar hasta llegar a la temperatura ambiente; suele necesitar varias horas. La microestructura resultante de este proceso es perlita gruesa (además de una fase Preeuctoide) que es relativamente blanda y dúctil.

Resulta obvio que el rango de temperatura donde se enfría el acero determina la microestructura final, así el grado de transformación dependerá del tiempo permitido para que ocurra la transformación. Así, un rango menor de enfriamiento y una mayor temperatura en la cual la completa transformación ocurre durante el recocido completo, la perlita gruesa estará con baja dureza. Este tratamiento se desarrolla en aceros de 0.30 a 0.60 de porcentaje de carbono los cuales tienen que ser maquinados.

La microestructura más favorable para la maquinabilidad en los aceros de bajo y medio carbono es la perlita gruesa. Este

tratamiento térmico es para desarrollar esta microestructura.

Es un tratamiento térmico simple y más utilizado en otros aceros. Así que el enfriamiento lento involucra mucho consumo de tiempo sobre el rango de temperatura de la austenización a una temperatura en la cual la transformación es completa (*W. Smith, 2006*).

Recocido subcrítico

Otro tipo de recocido llamado subcrítico consiste en calentar el acero debajo de la temperatura crítica de éste (Ac_1) y permanecer en este rango por un tiempo apropiado (de dos horas en adelante) seguido por un enfriamiento al aire.

El resultado de este recocido es suavizar el acero debido a una parcial coagulación del carburo a la forma de esferoidal o glóbulo pequeño de carburos, haciéndose más notorio en los aceros de medio carbono y alto carbono. Esto no es apropiado cuando se desea un control cerrado de la dureza o estructura, debido a que la estructura del acero determina el alto grado de esferoidización que ocurrirá. Por ejemplo, una perlita laminar gruesa puede mostrar poca evidencia de esferoidización después del tratamiento mientras una estructura martensítica o lami-



nar mostrará un marcado grado de esferoidización (O. Villarreal, 2002).

Etapas del tratamiento térmico de recocido

Recuperación

La microestructura original trabajada en frío está compuesta por granos deformados con gran número de dislocaciones entrelazadas.

Cuando al principio se calienta el metal, la energía térmica adicional permite que las dislocaciones se muevan y formen los bordes de una estructura subgranular poligonizada. Sin embargo, la densidad de las dislocaciones se mantiene virtualmente sin modificar. Este tratamiento a baja temperatura se llama recuperación.

Como durante la recuperación no se ha reducido el número de dislocaciones, las propiedades del acero quedan relativamente igual; sin embargo, al reordenar las dislocaciones se han reducido o incluso se han eliminado los esfuerzos residuales. Además, la recuperación restablece una alta conductividad eléctrica al metal.

Durante la recuperación, la resistencia de un metal trabajado en frío se reduce ligeramente, pero aumenta significativamente su

ductilidad (D. Askeland, 1998, O. Villarreal, 2002).

Recristalización

La recristalización ocurre debido a la nucleación y crecimiento de nuevos granos que contiene pocas dislocaciones. Cuando se calienta el acero por encima de la temperatura de recristalización, una rápida recuperación elimina los esfuerzos residuales, produciendo una estructura de dislocación poligonizada. En este momento ocurre la nucleación de granos en los bordes de celda de la estructura poligonizada, eliminando la mayoría de las dislocaciones. Dado que se ha reducido de manera importante el número de dislocaciones, el acero recristalizado tiene baja resistencia, pero una elevada ductilidad (D. Askeland, 1998).

A altas velocidades de calentamiento, ocurre primero la recristalización, por lo que existe una velocidad crítica de calentamiento, a la cual se producen simultáneamente ambos procesos: recristalización y precipitación. Las dislocaciones son responsables de retardar la recristalización (A. Monsalve et al, 2005, Yoda Rika, et al, 1994).

Tamaño de grano recristalizado

Varios factores también influyen sobre el tamaño de los granos recristalizados. La reducción de la temperatura del recocido, el tiempo utilizado para calentar hasta la tem-



peratura de recocido, o el tiempo de recocido también influyen en el tamaño del grano, al minimizar la posibilidad de crecimiento granular. También incrementando el trabajo en frío inicial se reduce el tamaño de grano final, al generar un mayor número mayor de sitios de nucleación para nuevos granos. Finalmente, la presencia de una segunda fase en la microestructura ayuda a evitar el crecimiento de grano, manteniendo pequeño su tamaño cuando ha recristalizado (*Kang Y. et al, 2008, Majta j. et al, 2007*).

Crecimiento de grano

Los granos grandes tienen menor energía libre que los pequeños. Esto se asocia con la menor cantidad de área de frontera de grano; por tanto, en condiciones ideales, el menor estado de energía para un metal sería aquel que tendría si estuviera formado por un solo cristal. Esta es la fuerza que impulsa el crecimiento de grano, oponiéndose a esta fuerza se encuentra la rigidez de la red. Conforme la temperatura aumenta, la rigidez de la red disminuye y la rapidez de crecimiento de grano es mayor. A cualquier temperatura dada hay un tamaño de grano máximo, punto donde estos dos efectos están en equilibrio. En consecuencia, teóricamente es posible que crezcan muy grandes, manteniendo una muestra durante largo tiempo en la región de crecimiento de grano.

El crecimiento de grano inicia cuando la primera recristalización está completa. Se caracteriza por un gradual decremento en la resistencia del material del incremento conmensurado en el tamaño de grano. Aunque la fuerza de empuje para la recuperación y recristalización es la energía almacenada del trabajo en frío, la fuerza de empuje para el crecimiento de grano es la minimización de la energía interfacial de las fronteras de grano, cuando el crecimiento de grano ocurre uniformemente en todos los granos, (por ejemplo mismo tamaño de grano promedio), esto es llamado crecimiento de grano normal. Cuando un número de granos adquiere tamaños de granos mucho mayor que otros, esto se llama crecimiento anormal de grano o recristalización secundaria (*O. Villarreal, 2002*).

Referencias bibliográficas

- D. Askeland. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3ª edición, (1998).
- W. Callister, Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed. Reverte, S.A, (1996).
- Kang Y. p. et al, Texture Development in Low Carbon Sheet Steels for Automotive Application, Chapter 5, Microstructure and Texture in Steel and Other Materials, Jamshedpur India, pp. 85-100, (2008).



Majta j. et al. Mechanical properties of ultra fine grained HSLA and Ti-IF steels *Material Science and Engineering*. Vol. 464, pp 186-191, (2007).

A. Monsalve *et al.* Efecto de la precipitación de nitrógenos de aluminio en la recristalización de aceros bajo carbono recocidos convencionalmente. *Revista de Metalurgia Madrid*, Vol. 41, pp 340-350, (2005).

Schindler J. P. et al. Effect of cold rolling and annealing on mechanical properties of HSLA steel, *Archivos de Ciencia de los Materiales e Ingeniería* 36/1, pp. 41-47, (2009).

W. Smith, Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* 4ª edición. Mc. Graw Hill (2006).

O. Villarreal. *Recristalización de cinta de acero laminado en frío 1006 en hornos de recocido tipo campana*. Universidad Autónoma de Nuevo León. (2002).

Wojcik, Jozef et al. Relación entre la estructura en estado recocido del grado del acero grado construcción y las propiedades mecánicas después de un tratamiento térmico final, Vol. 14, pp 203-207, (2007).

Yoda Rika, et al. Effect of Chemical Composition on Recrystallization Behavior and r-value in Ti-added Ultra Low Carbon Sheet Steels, *ISIJ International*, Vol. 34, pp 70-76, (1994).