

Propiedades mecánicas de aceros de bajo carbono con estaño y diferentes contenidos de elementos residuales

Mechanical properties of low carbon steels alloyed with tin and other residual elements

M. E. Noguez, J. E. Balderas, T. Robert*, J. Ramírez y G. Salas
Universidad Nacional Autónoma de México
Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Edificio "D", Facultad de Química,
Ciudad Universitaria, 04510, México, D. F. México
*robertn@servidor.unam.mx

Resumen

En este trabajo se evalúan las propiedades mecánicas de dureza, tensiles, temperaturas de transición dúctil-frágil y maquinabilidad de un acero fabricado a partir de recorte de hojalata estañada y de aceros comerciales 1018 adicionados con estaño, obtenidos por fundición en horno de inducción. Los resultados se comparan entre sí y con los reportados en la literatura para materiales similares. Se encontró que el acero reciclado de hojalata con el mismo contenido de estaño que un 1018 adicionado con este elemento presenta, en general, mejores propiedades dúctiles (elongación y reducción de área) atribuyéndose el resultado al bajo contenido de elementos residuales del acero de hojalata.

Palabras claves: Acero, estaño, residuales, propiedades mecánicas.

Abstract

A comparison in mechanical properties: hardness, tensile results, ductile-fragile transition temperatures and machinability is made between steel casting produced using 100% tin can scrap and tin added commercial 1018 steels. Results are also compared with literature data for similar steels. It is found that the steel produced with tin can scrap shows larger ductile properties (% elongation and area reduction). Analysis of the results suggests that the low residual elements content of the tin can steel is the responsible for this behavior.

Key words: Steel, tin, residuals, mechanical properties.

1 Introducción

Desde principios del siglo pasado, la presencia del estaño en el acero se ha considerado perjudicial por el efecto de fragilización en caliente que produce (Stead, 1916). Durante la II guerra mundial, la necesidad de usar grandes cantidades de chatarra de todo tipo puso en evidencia nuevamente el efecto del estaño como responsable de la fragilidad en caliente. Se evidenció también que el estaño tiene un efecto interrelacionado con el cobre y el azufre. Se supone que estos tres elementos forman un eutéctico ternario de bajo punto de fusión que puede colocarse intergranularmente y llegar a deteriorar la superficie (Koros, 1990). Se considera también que el Sn aumenta la tendencia del Cu a producir la fragilidad superficial en caliente; este efecto se debe a que el cobre se

acumula detrás de la capa de óxido de hierro y penetra en ciertas condiciones en los bordes de grano superficiales iniciando fisuras. Como una medida de control de la cantidad de Sn que puede permitirse en presencia de Cu se han desarrollado relaciones empíricas del tipo $\% \text{Cu} + 6\% \text{Sn} < A$ ó $\% \text{Cu} + 10\% \text{Sn} < A$, en donde A es un límite, usualmente entre 0.4-1.0 (Stephenson, 1983), arriba del cual se produce la fragilidad térmica. Otros efectos atribuidos al Sn son la disminución de la vida por fatiga, el aumento de la temperatura de transición y un aumento en la resistencia mecánica.

En la Tabla 1 se muestran los efectos del Sn en aceros, basados en los datos de diversos autores: Stephenson (1980 y 1983), Bain y Paxton (1966) y Koros (1990). Los datos usados en la primera columna pertenecen a aceros con Sn hasta 0.26% y fueron así agrupados por Stephenson porque

presentan propiedades similares sin importar el tipo de acero, el tratamiento térmico, o el contenido de C, lo cual resulta difícil de aceptar. En la segunda columna se agrupan resultados de numerosos estudios realizados hasta los 70 sin importar el contenido de Sn ó C y se obtuvieron promediando valores de propiedades. En la tercera columna el autor enfatiza los resultados reportados en la literatura como evidencia de la disparidad que puede haber y tal vez la no linealidad, sobre todo en contenidos bajos de carbono y en procesamientos efervescentes.

Los diversos estudios disponibles sobre la caracterización de los aceros con estaño, generalmente con un contenido entre 0.04 a 0.30 % Sn, tienen el inconveniente de haber sido hechos con los aceros de los años 40 a los 60 que difieren mucho en limpieza y elementos residuales con los aceros actuales.

Tabla 1. Efecto del incremento de 0.1% Sn en los aceros sobre algunas propiedades mecánicas

| Autores | Stephenson (1980) | Bain y Paxton (1966) Stephenson (1983) | Koros (1990) |
|---------------------------|----------------------|--|-----------------|
| Propiedad | | | |
| Resistencia a la tracción | +12.9 | +13.1-13.8 | |
| Resistencia a la fluencia | +10.8 | +11.0-17.2 | +52.4±0.2* |
| Elongación (%) | -0.7 | | |
| Reducción de área (%) | -1.61 | | |
| Dureza (HR _B) | | +3.0-4.6 | +5.5-6.1 |

* por 0.02%Sn

Por otra parte, recientemente se registró la patente de un acero con Sn (0.04 –0.7% Sn) que sustituye al Pb para los aceros maquinables tipo L sobre todo al 12L14 (Pennington, 1999), que ya se comercializa en Estados Unidos y Europa, lo que significa que los aceros con estaño pueden tener usos que no se contemplaban en el pasado.

De todo lo anterior se desprende la necesidad de evaluar nuevamente el efecto del Sn en el acero. El objetivo de éste trabajo se centró en contribuir al conocimiento del efecto del estaño en los aceros de bajo C. Se escogieron para este fin dos tipos de acero de bajo carbono: uno con un control estricto de elementos residuales como es el de la hojalata estañada y otro comercial con la misma composición nominal de carbono, al que se le agregó estaño en cantidad similar al de la hojalata. Los aceros en estado de colada se sometieron a ensayos mecánicos. Los datos obtenidos se analizan y discuten con los existentes en

la literatura y en forma secundaria se mencionan las aleaciones a las que se asemejan los aceros.

2 Experimentación

Se fabricaron los diferentes aceros en un horno de inducción Inductotherm en cargas de 20 Kg, colándolas en moldes preparados con arena en seco, que fueron elaborados con uno de los modelos recomendados en la norma ASTM A395 (“Standard Specification for Ferritic Ductile Iron Pressure Retaining Castings for Use at Elevated Temperatures”), de uso común para aceros.

Los aceros fueron:

Acero fabricado con recorte de hojalata estañada para envase de leche en polvo, en 2 cargas que se nombrarán X1 y X2.

Acero 1018 comercial con adición de 0.30% de Sn en dos cargas nombradas como A1 y A2 y una de acero 1018 como testigo.

Se siguió la práctica habitual de fundición de agregar óxido de calcio y espato flúor para escoriificar; durante la fusión se añadieron cantidades pequeñas y medidas de Fe-Si y Fe-Mn para compensar por la posible pérdida y se usó aluminio para desoxidar en el horno y en la cuchara.

La adición de estaño fue realizada empaquetando las cantidades determinadas en láminas delgadas de acero y fueron incorporadas, precalentadas, al final de fusión seguida de la desescoriificación y vaciado. La temperatura de colada se mantuvo en el intervalo de 1600 a 1646 °C.

Se necesitó colar 3 moldes para cada carga de acero con el objeto de obtener el material suficiente para preparar las probetas para los ensayos. La inspección visual determinó la ausencia de macroporosidades aparentes. Todas las muestras de los aceros se ensayaron en estado de colada.

Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina universal de ensayos mecánicos MTS 810 con sistema de control y adquisición de datos Testlink 2.0, de acuerdo a la norma ASTM E8 (“Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”). Los ensayos de dureza Rockwell B se realizaron en un durómetro digital Buehler, modelo Macromet 3, de acuerdo a la norma ASTM E18 (“Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials”). El ensayo de impacto Charpy se realizó según la norma ASTM E23 (“Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”) en un rango de temperaturas de –20 a 450 °C.

El grado de facilidad al maquinar las probetas, según la apreciación del técnico al comparar los aceros, se consideró como un indicador aproximado de la maquinabilidad.

Los análisis químicos se efectuaron en el laboratorio de servicio químico de la Facultad de Química de la UNAM, en donde se usó el espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3100, excepto en el carbono y en el

azufre, que se determinaron por el método volumétrico.

La microestructura se determinó en muestras preparadas y atacadas con nital en un Microscopio óptico metalográfico y se analizaron varias muestras en la Microsonda de un Microscopio electrónico de barrido JEOL modelo CF.

3.1 Aceros de recorte de hojalata

El contenido de Sn del recorte de hojalata inicial era de 0.4- 0.5% como puede observarse en la Tabla 2. En los aceros obtenidos por fundición a partir de hojalata el contenido de Sn final fue de 0.28-0.37%; el Sn se perdió en promedio 30 % durante la fusión.

Tabla 2. Composición química del recorte de hojalata utilizado para las fusiones.

| Elemento | % en peso |
|----------|---------------|
| Sn | 0.400 - 0.501 |
| C | 0.150 |
| Mn | 0.413 |
| Si | 0.113 |
| P | 0.016 |
| S | 0.019 |

En la Tabla 3 se muestran los análisis químicos finales de los aceros. El acero resultante tiene una variación en su contenido de C de 0.06 a 0.11% y cumple con la norma (Karel, 1975) en cuanto a contenido de residuales, excepto en el Si, el cual se encontró alto desde el análisis inicial (Tabla 2).

Tabla 3. Composición química de los aceros obtenidos a partir de hojalata y de la norma del acero base (United States Steel Corporation, 1971).

| Contenido (% en peso) | X ₁ | X ₂ | Norma de acero base (tipo L) |
|-----------------------|----------------|----------------|------------------------------|
| Sn | 0.37 | 0.29 | |
| C | 0.110 | 0.060 | 0.12 máx |
| Cu | 0.032 | 0.040 | 0.06 máx |
| Ni | 0.019 | 0.021 | 0.04 máx |
| Cr | 0.008 | 0.003 | 0.06 máx |
| Mo | 0.010 | 0.003 | 0.05 máx |
| Al | 0.006 | 0.001 | |
| Mn | 0.322 | 0.510 | 0.60 máx |
| Si | 0.211 | 0.210 | 0.01 máx |
| S | 0.020 | 0.014 | 0.05máx |
| P | 0.045 | 0.060 | 0.015máx |

La suma del Cu residual más 6 ó 10 veces el Sn, de acuerdo a la regla práctica mencionada, resulta 2.25 ó 3.732 en el acero X₁. En el acero X₂ la suma es 1.78 ó 2.94. Esto es mucho mayor que 1 por lo que se esperaría el efecto de fragilidad en caliente.

La Tabla 4 exhibe los resultados de los ensayos mecánicos de estos aceros; a manera de comparación

aproximada se encuentran los datos de un acero para hojalata en estado de laminado en caliente; los valores obtenidos indican que la dureza y la elongación se elevan levemente, la resistencia a la fluencia disminuye ligeramente y la resistencia a la tracción se eleva en el acero que no tiene pérdida de C. No es posible evaluar cuantitativamente el aumento en propiedad por porcentaje de Sn agregado ya que no se tienen datos para un acero similar sin estaño. Sin embargo, los valores de elongación y reducción de área son sorprendentemente altos diferentes a lo reportado y mostrado en la Tabla 1, indicando una buena ductilidad, como ya se dijo. En cuanto a la temperatura de transición, los valores obtenidos para estos aceros indican una elevación considerable de la misma comparándolos con un valor de -60 °C que se reporta para aceros al carbono en libros de texto (Schaffer et al., 1995). El aumento de temperatura de transición, calculado desde -60 °C, es de 133 °C para el acero X₁ y de 88 °C para el X₂ y corresponden al rango reportado en la literatura y mostrado en la Tabla 1. El acero X₂ tiene valores de propiedades mas bajas que el X₁ lo cual se podría explicar por el contenido de carbono mas bajo (0.06%, Tabla 3).

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los aceros obtenidos a partir de hojalata y de una lámina de acero de comparación

| Propiedad | X ₁ | X ₂ | Lámina* |
|--|----------------|----------------|---------|
| Resistencia a la tracción (MPa) | 373.0 | 352.7 | 359.0 |
| Resistencia a la fluencia (MPa) | 208.9 | 175.2 | 262.0 |
| Elongación (%) (L ₀ =50 mm) | 44.0 | 34.4 | 30.0 |
| Reducción de área (%) | 45.4 | 32.6 | |
| Dureza (HR _B) | 64.0 | 55.7 | 55.0 |
| Indicador de maquinado | Bajo | Bajo | |
| Temperatura de transición (°C, a 20J) | 73 | 28 | |

*acero laminado en caliente (ASM International, 1997)

Desde el punto de vista de los ensayos tensiles parecería que el Sn incrementa la resistencia y la dureza por el hecho de encontrarse disuelto en el Fe. Se podría usar en piezas de fundición misceláneas de acero bajo carbono; tendría la limitante de no poder usarse en trabajado mecánico en caliente por su contenido de Cu + Sn de acuerdo con la regla para determinar la fragilidad en caliente. La alta temperatura de transición deberá también de tomarse en cuenta, ya que con los valores encontrados se asemejan a aceros de 0.40-0.60% de C (Schaffer et al, 1995).

3.2 Aceros con adición de Sn

En la Tabla 5 se encuentran los resultados finales de los análisis químicos para los aceros a los que se agregó el estaño y del acero 1018 refundido que se usó como materia

prima. En la Tabla 6 se muestran los resultados de los ensayos mecánicos a los que se sometieron los materiales.

El acero resultante tiene contenidos de C de 0.16 a 0.19% y residuales relativamente altos (Cu, Ni, Cr y Si) relativos a la norma del acero base para hojalata. Su contenido de Cu más 6 ó 10 veces el Sn también es superior a 1, por lo que tampoco sería apto para trabajado mecánico en caliente.

Tabla 5. Normas para los aceros AISI 1018 y base de hojalata y análisis químico de los aceros 1018 y 1018 adicionado con 0.3% Sn, A₁ y A₂.

| Contenido (% en peso) | Norma AISI 1018 | Norma Acero Base (tipo L) | 1018 | A ₁ | A ₂ |
|-----------------------|-----------------|---------------------------|-------|----------------|----------------|
| Sn | | | | 0.30 | 0.31 |
| C | 0.15-0.20 | 0.12 máx | 0.196 | 0.167 | 0.184 |
| Cu | | 0.06 máx | 0.150 | 0.185 | 0.180 |
| Ni | | 0.04 máx | 0.072 | 0.071 | 0.069 |
| Cr | | 0.06 máx | 0.026 | 0.024 | 0.020 |
| Mo | | 0.05 máx | 0.021 | 0.011 | 0.009 |
| Al | | | 0.34 | 0.186 | 0.002 |
| Mn | 0.60-0.90 | 0.60 máx | 0.356 | 0.370 | 0.287 |
| Si | 0.10 máx | 0.01 máx | 0.222 | 0.382 | 0.076 |
| S | 0.05 máx | 0.05 máx | 0.019 | 0.017 | 0.018 |
| P | 0.04 máx | 0.015 máx | 0.013 | 0.019 | 0.020 |

Tabla 6. Propiedades mecánicas de los aceros AISI 1018 y adicionados con estaño.

| Propiedad | 1018 | A ₁ | A ₂ |
|---------------------------------------|--------------------|----------------|------------------|
| Resistencia a la tracción (MPa) | 421.4 | 470.3 | 460.9 |
| Resistencia a la fluencia (MPa) | 226.5 | 264.1 | 261.4 |
| Elongación (%) (L ₀ =50mm) | 38.6 | 9.9 | 9.3 |
| Reducción de área (%) | 57.4 | 7.6 | 6.5 |
| Dureza (HR _B) | 68.6 | 78.5 | 78.6 |
| Indicador de maquinado | Bueno | Bueno | Bueno |
| Temperatura de transición (°C) | 20J 54J FATT | 8 30 54 | 55 118 133 |

Comparados con el mismo acero 1018 fundido sin Sn, los resultados tensiles indican que conforme aumenta el Sn, por cada 0.1%, hay un incremento en resistencia a la fluencia en 11 MPa y de 14.8 MPa en resistencia a la tracción. El aumento en dureza es de 3.2 puntos de Rockwell B; sin embargo hay una considerable pérdida de elongación y de reducción de área significando una

fragilidad mucho mayor que la conocida en la bibliografía. El aumento en la temperatura de transición es comparable al reportado y se encuentra dentro del intervalo de temperaturas reportado para el acero de hojalata estañada, similar a la temperatura de transición de un acero al carbono con 0.5% C (Schaffer et al., 1995). Estos resultados se muestran comparativamente en la Tabla 7. La maquinabilidad se considera buena.

Tabla 7 Comparación del efecto del incremento de 0.1% Sn sobre las propiedades del acero adicionado con Sn.

| Propiedad | Tabla 1 | 1018 con 0.3%Sn |
|---------------------------------|------------|-----------------|
| Resistencia a la tracción (MPa) | +12.9-13.8 | +14.8 |
| Resistencia a Fluencia (MPa) | +10.8-52.4 | +11 |
| Elongación (%) | -0.7 | -7 a -9.5 |
| Reducción de área (%) | -1.61 | -10 a -17 |
| Dureza(HR _B) | +3-6.1 | +3.2 |
| Temperatura de transición (°C) | 0 a +204 | +114.5° C |

En general el grupo de aceros con adiciones de Sn de 0.3% se asemeja en sus propiedades a los aceros de alto azufre y a algunas fundiciones maleables (moderados valores de resistencias, bajas elongaciones y buena maquinabilidad).

3.3 Microestructura

Las microestructuras son de colada, con similares tamaños de grano, notándose el contenido ligeramente diferente de perlita entre un acero con 0.06 %, 0.11% y 0.16% de C. No hay microsegregación apreciable. En ambos aceros, la microscopía electrónica de barrido muestra apenas la segregación intergranular del estaño; de esto se desprende que se descartan efectos microestructurales como responsables de la diferencia de propiedades entre los aceros de los dos grupos. Es por esto que las microestructuras correspondientes no se muestran en éste trabajo.

Si se comparan los resultados de los dos grupos de aceros con estaño se podría decir que las diferencias en propiedades, específicamente la elongación y reducción de área parecen determinadas por la cantidad de residuales y del C, sin poder generalizar el papel del Sn en el comportamiento. El estudio de las interrelaciones y efectos de otros elementos con el Sn en el acero inicia como un

área de desarrollo promisorio sobre todo para ayudar en el éxito del reciclaje (Cochrane, 2000).

4 Conclusiones

El acero fabricado con 100% de recorte de hojalata estañada con contenido de 0.3% Sn presenta propiedades en el rango de los aceros bajo carbono que permitirían darle un uso comercial para piezas fundidas, resultando especialmente notables los valores de elongación y reducción de área que indican una buena ductilidad.

El acero 1018 de pureza comercial adicionado de 0.3% Sn presenta el efecto detrimental en ductilidad que se ha reportado en la literatura, en forma más pronunciada.

No se puede concluir cuantitativamente una relación definida entre el efecto del Sn y la modificación de propiedades.

Las propiedades de elongación y reducción de área parecen depender de la cantidad de elementos residuales que lo acompañan, además del contenido del C, a diferencia de lo que hasta ahora se había mencionado en la literatura.

Referencias

- ASM International, 1997, Metals Reference Book, 3rd edition, USA.
- Bain EC y Paxton HW, 1966, Alloying elements in steel, 3rd edition, ASM International, USA.
- Cochrane B, 2000, Alloyed success for steel recycling, Materials World, 8. 7. 17-19.
- Karel M, 1975, Physical principles of food preservation, Ed. M. Dekker, New York.
- Koros PJ, 1990, Tin as a residual alloy in steel, AISI Committee on Technology (Reporte Técnico), 1-9.
- Pennington JN, 1999, Green steel eliminates lead, Modern Metals. 55. 11. 38-39, 41.
- Schaffer JP, Saxena A, Antolovich SD, Sanders TH Jr y Warner SB, 1995, The science and design of engineering materials. Irwin, USA.
- Stead JE, 1916, Influence of some elements on the mechanical properties of steel, en Stephenson ET, 1974 Tin and properties of steel, Journal of metals. 26. 3. 48-51.
- Stephenson ET, 1980, The effect of tin on the toughness of some common steels, Metallurgical Transactions, 11A. 3. 517-524.
- Stephenson ET, 1983, Effect of recycling on residuals, processing and properties of carbon and low alloy steels, Metallurgical Transactions, 14A, 3. 343-353.
- United States Steel Corporation, 1971, The Making, Shaping and Treating of Steel, Edited by H.E. McGannon, Pittsburgh.