

EFFECTOS DE LAS VARIACIONES EN LAS CONDICIONES DE DEFORMACION POR LAMINADO EN CALIENTE SOBRE LA ESTRUCTURA DE ALAMBRONES DE BAJO CARBONO

IMPACT OF CHANGES IN THE TERMS OF STRAIN FOR HOT ROLLED ON THE STRUCTURE OF LOW CARBON WIRE RODS

Matías E. García¹, Mariela Melia¹, Elena Brandaleze¹

(1) Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Grupo Tecnología de Procesos, Departamento de Metalurgia – DEYTEMA, Colón 332, San Nicolás, Buenos Aires - Argentina
(e-mail: megarcia@frsn.utn.edu.ar)

Recibido: 10/12/2015 - Evaluado: 05/01/2016 - Aceptado: 18/01/2016

RESUMEN

Se estudian alambrones de bajo carbono SAE 1008 laminados y procesados en el cabezal formador de espiras a dos temperaturas diferentes, para optimizar la cascarilla. Es fundamental, conocer el impacto de las variaciones de las condiciones durante el conformado para predecir las propiedades del producto final. Se evalúa la estructura del alambroón y de la cascarilla generada. En el estudio estructural se aplica microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM), se determina el tamaño de grano y los porcentajes de fases presentes. Se identifican las fases y se miden los espesores de las capas de la cascarilla. Mediante perfiles de microdureza se establece el efecto de las condiciones de procesamiento sobre el producto. La variación de 8% en la temperatura de formación de espiras no produjo cambios estructurales ni de comportamiento en el producto de acero. Se ha generado una cascarilla constituida principalmente por wüstita, apta para decapado químico.

ABSTRACT

Wires of SAE 1008 steel, processed in the coil-forming head at two different temperatures to optimize the scale, were studied. It is relevant determine the impact of the changes of hot rolling process conditions in order to predict the mechanical properties of the final product. The structural characteristics of the steel wire and the scale layers generated during the processing conditions are evaluated. The structural study was carried out by light microscopy and scanning electron microscopy (SEM). Grain size and the phases percentage in the steel are determined. In addition, the phases present and layer thicknesses in the scale, are determined. Microhardness profiles on the product structure allows evaluating the effect of process conditions on the product. 8% variation in the coil forming temperature not produce structural changes or behavior in the steel product. It has generated a crust consisting mainly of wustite, suitable for chemical descaling.

Palabras clave: alambroón, cascarilla, acero bajo carbono, estudio estructural

Keywords: wire rod, scale, low carbon steel, structure

INTRODUCCIÓN

El producto de acero, antes de ingresar al proceso de trefilado, se conforma a partir de barras cilíndricas mediante laminación en caliente empleando como matriz cajas constituidas por dos rodillos verticales que giran en sentido inverso uno respecto de otro, produciendo el estirado longitudinal y logrando la reducción del diámetro pretendida. En la laminación, el estirado longitudinal y el diámetro final dependen de la cantidad de cajas por la cual pase el material y de la distancia entre los rodillos. Cabe recordar que existen dos clases de laminación dependiendo de la temperatura de proceso: 1) laminación en frío: cuando el material se procesa por debajo de la temperatura de recrystalización y 2) laminación en caliente: cuando la deformación se lleva a cabo por encima de la temperatura de recrystalización.

Durante los procesos de deformación en caliente, los productos de acero sufren oxidación a nivel superficial. La oxidación implica la formación de la denominada cascarilla, constituida por diferentes capas de óxidos de hierro, que se generan a alta temperatura (Kondo *et al.*, 2012). Su espesor final está relacionado con la pérdida del rendimiento metálico del producto. Además, los procesos posteriores del producto semielaborado, pueden requerir características estructurales particulares sobre las fases constitutivas de la cascarilla tanto para el logro de una adecuada calidad superficial del producto como para evitar el desgaste excesivo de los equipos. Tal como expresa Biroasca *et al.* (2004), el tipo de óxidos presentes en la cascarilla también afecta las condiciones de fricción y transferencia de calor durante el procesamiento del producto. Una alternativa de control de las características de la cascarilla durante el procesamiento industrial, puede ser a través de la variación de la temperatura final de formación de espiras.

Es importante mencionar que la cascarilla usualmente puede estar constituida por una capa fina externa de hematita (Fe_2O_3), una capa intermedia de magnetita (Fe_3O_4) y una capa de wüstita (FeO) en contacto con el metal base que posee el menor contenido de oxígeno (Biroasca *et al.*, 2004). Esta última es inestable a temperaturas $\sim 560^\circ\text{C}$, de acuerdo a lo informado por Taneí & Kondo (2012). En Biroasca *et al.* (2005), se describen aspectos de la formación de la cascarilla y la complejidad de la identificación de las fases presentes en la capa de óxidos mediante técnicas de microscopía tradicionales. La variación de las condiciones térmicas durante la formación de espiras, pueden modificar además de las características estructurales de la cascarilla (en cuanto a los espesores de las capas como de las fases óxidos presentes), la estructura del metal base afectando las características estructurales y propiedades mecánicas finales del producto. Cabe recordar que cuanto mayor es la temperatura, el espesor de cascarilla se incrementa dado que aumenta la difusión de iones de Fe y oxígeno.

Luego de la laminación, el producto se somete a un proceso de enfriamiento mediante un sistema Stelmor. Posteriormente el alambón continúa su conformado a través del proceso de trefilado, que se realiza a temperatura ambiente y consiste en someter al producto a pasar a través de una serie de hileras mediante diversas pasadas, aplicando un esfuerzo de tracción (Galvez *et al.*, 2001). De esta manera, se consigue el estirado longitudinal y la reducción de diámetro requerida. La eficiencia del proceso de trefilado, depende en gran parte de las condiciones del proceso de laminación previo, como así también de:

- La composición química del acero (que define la resistencia a la tracción del mismo)
- Las condiciones de decapado mecánico (dependen de la cantidad y calidad de la cascarilla o laminillo)
- Las condiciones de trefilado (de acuerdo a la trefilabilidad del material y esto determina la velocidad del trefilado)

En este trabajo, se informan resultados obtenidos en un estudio realizado sobre alambres de acero SAE 1008 laminados, contemplando diferentes condiciones de enfriamiento en la línea de producción. A tal fin, se hace pasar el alambón a través de cajones que inyectan agua y luego siguen por un transportador en donde diversos ventiladores soplan aire desde abajo. Durante esta estrategia de enfriamiento, estos ventiladores pueden cubrirse mediante una tapa y así obtener la velocidad de enfriamiento requerida para el producto, de acuerdo a la aplicación del mismo. Cabe mencionar que dentro de las principales aplicaciones de este tipo de productos se pueden citar: semiproducto para producción final de alambres por trefilado, alambre negro, alambre galvanizado, tejidos metálicos, entre otros.

Sobre los alambrones de bajo carbono, procesados bajo diferentes condiciones de temperatura de formación de espiras, se realiza un estudio estructural mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM) que incluye determinar el porcentaje de fases presentes en el material base, del tamaño de grano y la microdureza, con el objetivo de predecir el comportamiento del producto final. Además, se realiza la caracterización estructural de la cascarilla y se determina la microdureza en la capa que presenta mayor espesor para identificar el tipo de óxido presente. La capa de óxido de menor espesor se identifica a través de la estructura cristalina mediante Electron Backscatter Diffraction (EBSD). Los óxidos presentes indican el comportamiento mecánico con miras a sugerir un proceso de descascarillado eficiente. La remoción o disminución del espesor de la cascarilla es importante para cumplir con las altas demandas de la calidad superficial y requerimientos de los procesos industriales actuales (Balaska *et al.*, 2014). Es importante profundizar los estudios sobre cascarilla de productos de acero convirtiendo esto en un tema de estudio de interés industrial (Chen & Yuen, 2005).

METODOLOGÍA

Material en estudio

Se disponen para el estudio de dos muestras de alambroón de bajo carbono SAE 1008 identificadas como 232 y 268 (ver Figura 1) que fueron tratadas a dos temperaturas diferentes en el cabezal formador de espiras y se enfriaron en línea sobre un transportador Stelmor con ventiladores (soplando aire desde abajo) y utilizando dos diferentes porcentajes de apertura de aire del primer ventilador, con el objetivo de generar una disminución de pérdida de rendimiento metálico por formación de cascarilla. El diámetro de los alambrones es de 6,40 mm y la composición química se puede observar en la Tabla 1. En la Tabla 2, se detallan las condiciones de temperatura de formación de espiras y de enfriamiento seleccionadas para el estudio.



Fig. 1: Aspecto de las muestras de alambroón SAE 1008.

Tabla 1: Composición química de las muestras de alambroón.

%C	%Mn	%Si	%P	%S
0.07	0.38	0.13	0.008	0.019

Tabla 2: Condiciones de proceso de laminación y enfriamiento de cada muestra.

Muestra	Temperatura de formación de espiras [°C]	Apertura de aire en ventilador Stelmor n°1 [%]
232	970	0
268	890	50

Experimental

Con el objetivo de realizar el estudio estructural de las muestras se prepararon cortes transversales y longitudinales. Luego se embutieron en resina epoxi, se pulieron con papeles de SiC (180 - 1200 μm) y se finalizaron con pasta de diamante hasta 1 μm . Se atacaron químicamente con Nital 2% (2ml HNO_3 en 100ml de alcohol).

Se realiza el estudio estructural mediante un microscopio óptico OLYMPUS GX51, que cuenta con un sistema de análisis de imágenes LECO IA32, que comprende la determinación de tamaño de grano y la fracción volumétrica de los microconstituyentes presentes (ferrita y perlita). Sobre la cascarilla, se realiza una caracterización que involucra la identificación de las fases presentes y la determinación del espesor promedio de cascarilla. Se realizan además perfiles de microdureza en forma radial tanto sobre el metal base como en la capa de óxido de mayor espesor que se contempla como la fase principal.

Para la determinación del tamaño de grano, se aplica el método denominado por comparación establecido en la norma IRAM IAS U500 – 122, y los resultados obtenidos se corroboran empleando el software Material Plus 4.2. En la medición, se seleccionan 5 zonas de la muestra transversal tal como se indica en la Figura 2. La medición se efectúa contemplando un aumento de 200x.

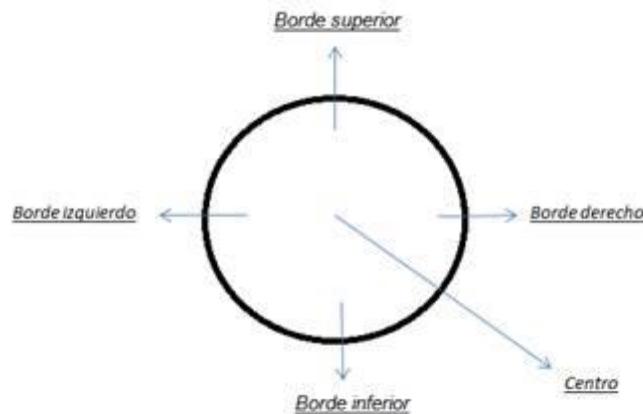


Fig. 2: Zonas seleccionadas para medición de tamaño de grano y porcentaje de fases en las muestras de alambroón.

La determinación del porcentaje de fases, se realiza mediante el método de colorimetría que posee el sistema de análisis de imágenes LECO IA32, el cual consiste en colorear los constituyentes presentes ya sea cada uno por separado o en conjunto. En este ensayo, se realizaron también 10 mediciones sobre las 5 zonas seleccionadas y mencionadas previamente. Se eligió un sentido antihorario, comenzando por el borde superior y continuando según lo indicado en Tabla 3.

Tabla 3: Zonas de medición de porcentaje de fases.

Zona de la probeta	Numeración de medición
Borde superior	1
Borde izquierdo	2
Borde inferior	3
Borde derecho	4
Centro	5

En cuanto a la caracterización de la cascarilla, se realiza la observación de las diferentes capas de óxidos y se determina el espesor promedio de la capa aplicando mediciones longitudinales sobre la capa de cascarilla en forma radial mediante el software LECO IA32. Se establecieron dos zonas de medición, una denominada "interior" y la restante llamada "total" correspondientes a dos capas de óxidos diferentes, efectuándose en total 370 mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las dos muestras analizadas para ambas condiciones de proceso de enfriamiento, poseen una estructura ferrítico – perlítica, siendo la ferrita el constituyente mayoritario. Esto concuerda con la determinación del porcentaje de fases realizado, en donde los resultados arrojan valores porcentuales elevados de ferrita (cerca al 100%), ver Tabla 4. Se observa al comparar los constituyentes correspondientes a los dos alambres, que la diferencia en el porcentaje de ferrita y perlita es despreciable (< 1%). Esto permite comprender que al aumentar la temperatura de formación de espiras en un 8%, no existe una variación significativa sobre la cantidad de la fase perlítica, por lo que puede considerarse que las condiciones de procesamiento planteadas no influyen sobre la microestructura del material base.

Tabla 4: Resultados de los porcentajes promedio de fases determinados con una dispersión de $\pm 5\%$.

Muestra	% promedio de ferrita	% promedio de perlita	·(%)
232	96,1	3.9	0.9
268	97,0	3.0	0.9

Los resultados de la medición del tamaño de grano realizadas en múltiples zonas de la sección de las muestras de ambos alambres, indican que ambas presentan el mismo índice G, siendo este igual a 9, Tabla 5.

Tabla 5: Índice G calculado para las dos muestras en las 5 zonas seleccionadas para la medición.

zona de la probeta	Índice G	
	232	268
borde superior	9	9
borde izquierdo	9	9
borde inferior	9	9
borde derecho	9	9
Centro	9	9
G promedio	9	9

Con el objetivo de corroborar dicha información se aplica una segunda metodología de evaluación del tamaño de grano que contempla la determinación de la cantidad de granos por mm^2 en las mismas zonas indicadas en Tabla 5. A tal fin, se sigue el procedimiento de la norma IRAM IAS U500 – 122, descrito en el punto 3.4 y se aplica para el cálculo la (ec. 1):

$$m = 8 \times 2^G \quad (1)$$

Siendo m la cantidad de granos por mm^2 y G el índice de tamaño de grano. Los resultados indican que en todas las zonas de medición, se registran ~ 4096 granos/ mm^2 . Comparando estos valores con la tabla II de dicha norma, se establece que en ambas muestras, la cantidad de granos es similar.

La correlación de resultados obtenidos en base a los valores de porcentaje de fases y de tamaño de grano en ambas muestras, comprueban que no existe un impacto desfavorable sobre la estructura del producto debido a las condiciones de procesamiento planteadas para el estudio.

En cuanto al impacto ejercido por las condiciones de temperatura de formación de espira sobre el comportamiento mecánico del producto, se puede notar que no existen grandes diferencias sobre la microdureza del metal base entre las muestras 232 y 268 (Figura 3).

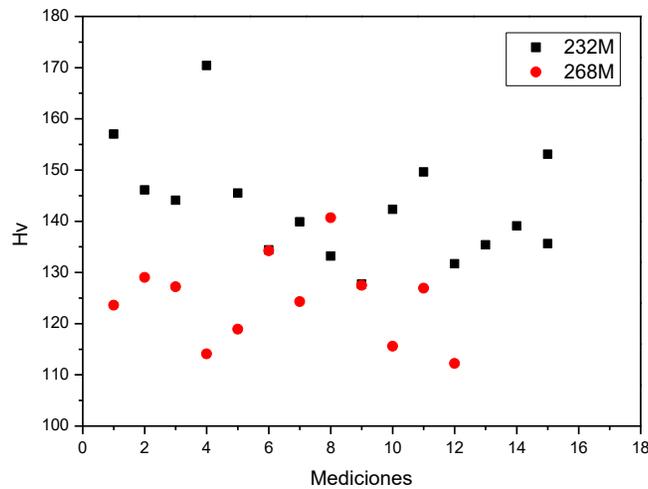


Fig. 3: Valores de microdureza determinados en el metal base de ambas muestras de alambrión.

En cuanto a la caracterización estructural de la capa de cascarilla, se verificó a partir de la microscopía óptica la existencia de dos capas de óxidos diferentes presentes, con distinta tonalidad de gris y distinto espesor, Figura 4. La capa más oscura, indicada como "W", corresponde al óxido denominado wüstita (FeO) en contacto con el metal base y que resulta menos rica en oxígeno (Biroscia *et al.*, 2004). Se corroboró dicha fase, a partir de la determinación de microdureza. Los valores promedio obtenidos en la capa de óxido de ambas muestras (232 y 268) rondan en el rango de Hv entre 300 y 400, estos valores corresponden al intervalo de microdureza del óxido wüstita (FeO) de acuerdo a la literatura (Basabe & Szpumar, 2006). (Figura 5)

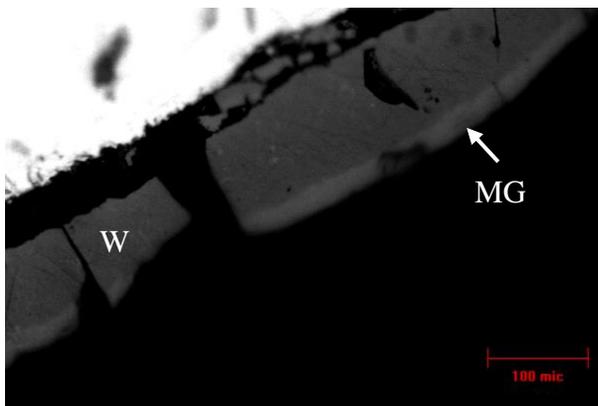


Fig. 4: Aspecto de las capas presentes en la cascarilla del producto.

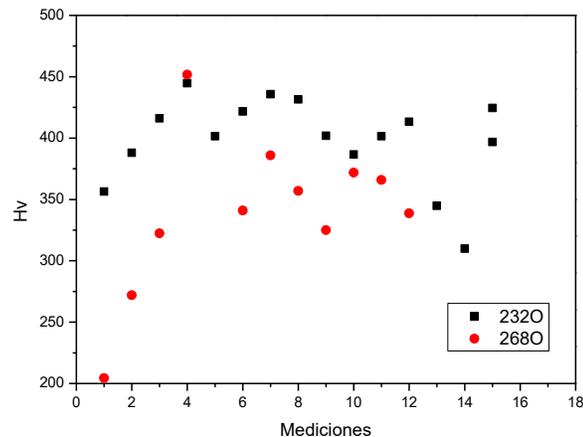


Fig. 5: Valores de microdureza correspondientes a la Wüstita determinados sobre ambas muestras.

Cabe mencionar que la técnica de microdureza empleada no se ha podido aplicar sobre la capa más externa que constituye la cascarilla debido a su bajo espesor. Sin embargo, se ha logrado identificar la fase magnetita (Fe_3O_4) a través de la estructura cristalina específica empleando la técnica de Electron Backscatter Diffraction EBSD.

La determinación de espesor de cascarilla en las muestras en estudio (232 y 268) permite comprobar que al disminuir la temperatura de formación de espiras en un 8%, el espesor de cascarilla disminuye un 13% favoreciendo el rendimiento metálico del producto sin afectar las características del producto final. En la Tabla 6, se presenta una comparación de los aspectos: espesor promedio de cascarilla, tamaño de grano y porcentajes de microconstituyentes relevados en el trabajo, que permiten justificar la afirmación propuesta.

Tabla 6: Aspectos relevados sobre las muestras 232 y 268.

Propiedad	Muestra 232	Muestra 268	$\Delta(\%)$
	$T_{\text{formación espiras}} = 970^\circ\text{C}$	$T_{\text{formación espiras}} = 890^\circ\text{C}$	
Espesor promedio total cascarilla (μm)	113	130	13%
Tamaño de grano ($\text{N}^\circ\text{ASTM}$)	9	9	0%
Porcentaje de ferrita (%)	96,1	97,0	0,9%
Porcentaje de perlita (%)	3,9	3,0	0,9%

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el trabajo se puede concluir que:

- La variación en un 8% en la temperatura de formación de espiras no ha producido cambios en cuanto al tamaño de grano, porcentaje de fases y microdureza del acero, por lo que se establece que esta variación no ha afectado las propiedades asociadas al material base del producto.
- Se comprobó que la cascarilla en las condiciones industriales planteadas, presenta dos fases principales: una gris oscura de wüstita (FeO) y la superficial más clara, que está constituida por magnetita (Fe_3O_4).
- La presencia de wüstita (FeO) se corroboró por medio de los valores de microdureza determinados en la capa interna de óxido dado que los valores habituales en dicha fase resultan $H_v = 386$.
- La disminución de la temperatura de formación de espiras de un 8 % generó una disminución del 13% del espesor de la cascarilla, esto indica una importante reducción de la pérdida de rendimiento metálico del producto que representa un resultado de importancia a nivel industrial.
- La elevada proporción de wüstita (FeO) en la cascarilla permite sugerir como proceso de descascarillado de mayor eficiencia el decapado químico.

REFERENCIAS

1. Balaska, A., Hamouda, A. & Rahmani, K. (2014). *Study of the morphology of oxide scale form on hot-rolled Steel*. La 2^{ème} conférence internationale des énergies renouvelable (CIER'14)-Tunisie.
2. Basabe, V. & Szpumar, J.S. (2006). Phase composition of oxide scales during reheating in hot Rolling of low carbon steel. *Process Metallurgy-Hot rolling, Steel Research*, 77, 818 – 824.
3. Biroasca, S., Dingley, D. & Higginson R.L. (2004). Microstructural and microtextural characterization of oxide scale on steel using electron backscatter diffraction. *Journal of microscopy*, 21, 3, 235-240.

4. Biroasca, S., West, G.D. & Higginson R.L. (2005). Microstructural investigation of the oxide scale on low carbon steel. *Hradec nad Moravicí*, 5, 24-26.
5. Chen, R.Y. & Yuen, W.D.Y. (2005). Examination of oxides scales of hot rolled steel products. *ISIJ International*, 45 (1), 52-59.
6. Galvez, F., Atienza, J.M., Ruiz, J. & Elices, M. (2001). Influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de alambres de acero trefilados. *Anales de Mecánica a la Fractura*, 18, 185-189.
7. Kondo, Y., Tanei, H., Ushioda, K. & Maeda, M. (2012). Role of Hematite Formation on Blister Generation during High Temperature Oxidation of Steel. *ISIJ International*, 52 (12), 2254-2259.
8. Tanei, H. & Kondo, Y. (2012). Effects of Initial Scale Structure on Transformation Behavior of Wüstite. *ISIJ International*, 52 (1), 105-109.