

Microestructura y propiedades mecánicas del Acero AISI 1016 calibrado procesado por ECAP

D.M. Marulanda✉, J. Cuellar, C. Rojas, L.M. Acosta

Microstructure and mechanical properties of cold drawn AISI 1016 steel processed by ECAP

Abstract

Low carbon cold drawn steel was deformed using equal channel angular pressing to evaluate its mechanical properties and microstructure, while assessing the possibility of improving properties beyond the cold drawn process. We used low carbon cold drawn steel with a composition of 0.16% C, 0.8% Mn, 0.2% Si, 0.02% P, 0.012% S and Fe balance. The process was carried out at room temperature and four passes at route Bc with a deformation of ~ 0.6 in each pass. Using scanning electron microscopy and x-ray diffraction, we evaluated the evolution of the structure before and after deformation as well as the mechanical properties of microhardness and tensile strength. A slight increase in the mechanical properties occurred when the number of passes was increased. There were changes in the original ferritic-pearlitic structure with the refinement of ferrite grains and pearlite deformation.

Keywords: Equal channel angular pressing; ECAP; low carbon steel; structure refinement; tensile strength; microhardness.

Introducción

El acero AISI 1016 es un material económico, de bajo contenido de carbono, muy usado en la fabricación de partes de maquinaria que no están sometidas a grandes esfuerzos mecánicos, por ejemplo ejes, eslabones para cadenas, pasadores, bujes cementados, tornillería corriente, bridas y piñones para transmisión de cadena a bajo esfuerzo, entre otros (Selçuk et al. 2003). Las propiedades superficiales de este acero pueden mejorarse por carburización, carbo-nitruración o borurización (Selçuk et al. 2003, Icziler & Tabur 2006), por medio de la formación de una capa superficial que mejore las propiedades del acero tales como la resistencia a la fricción, al desgaste y a la corrosión. Sin embargo, con estas técnicas el material puede tratarse solamente de forma superficial.

Citation: Marulanda DM, Cuellar J, Rojas C, Acosta LM (2014) Microstructure and mechanical properties of cold drawn AISI 1016 steel processed by ECAP. *Universitas Scientiarum* 19(2): 139-146
doi: 10.11144/Javeriana.SC19-2.mpma

Electronic supplementary material: Esta versión en español



Por otro lado, para modificar las propiedades de este acero en todo su volumen se utiliza el calibrado, que consiste en reducir la sección de una barra presionándola a través de una matriz cónica (Atienza et al. 2005), lo que implica una deformación plástica del material. Con la deformación por calibrado, la resistencia a la tensión y dureza del acero aumentan, mientras la ductilidad y la resistencia al impacto disminuyen. Este proceso es considerado como uno de los métodos más efectivos y flexibles para mejorar el acabado superficial, obtener dimensiones precisas y propiedades mecánicas específicas (Raji & Oluwole 2011). Adicional a los procesos mencionados, existen otros procesos que modifican las propiedades del acero por medio de la transformación de su estructura interna, llamados deformación plástica severa (SPD - Severe Plastic Deformation). En la deformación plástica severa, los materiales se someten a deformaciones muy grandes para producir tamaños de partícula entre 100-1000 nm y estructuras tales como subgranos, dislocaciones y tamaños de cristalito menores a 100 nm, por lo cual se consideran materiales nanoestructurados (Zhu et al. 2004). Dentro de las técnicas de deformación plástica severa (Langdon 2008), la deformación por presión en canal angular de sección constante (ECAP – Equal Channel Angular Pressing) ha ganado mucha atención debido a la posibilidad de producir materiales en gran volumen completamente densos y sin poros, con granos en el rango micrométrico o incluso nanométrico (Fan et al. 2013).

De acuerdo a lo anterior, se presenta un estudio sobre la influencia de la realización del proceso ECAP en un acero de bajo carbono calibrado, con el fin de evaluar su microestructura y propiedades mecánicas e identificar la posibilidad de mejorar sus propiedades más allá del proceso de calibrado.

Materiales y métodos

El material usado fue acero de bajo carbono AISI 1016 de composición 0.16% C, 0.8% Mn, 0.2% Si, 0.02% P, 0.012% S y balance Fe. Se utilizó un acero comercial con un grado de calibrado de 55% y diámetro de 6 mm. Para realizar el proceso ECAP se utilizó una matriz de dos piezas fabricada con acero D2, con un canal de ángulo interno $\Phi = 120^\circ$ y ángulo externo $\Psi = 30^\circ$, lo que produce una deformación de ~ 0.6

en la muestra después de cada pasada. Se utilizaron barras del acero de 50 mm de largo. Tanto las barras de acero como el canal fueron cubiertas con bisulfuro de molibdeno (MoS_2) para lubricación. El proceso se realizó a temperatura ambiente usando la ruta Bc hasta cuatro pasadas a una velocidad de procesamiento de 5 mm/min.

Después del proceso ECAP, se tomaron muestras del plano Y de las barras deformadas, que es el plano paralelo a las caras laterales a la salida del molde. La evolución de la microestructura se observó usando microscopía electrónica de barrido (MEB) en un equipo marca Jeol modelo JSM 6490-LV funcionando a 10 kV. Los cambios de fase y el tamaño de cristalito se estudiaron usando difracción de rayos X (DRX) en un equipo X'Pert ProAnalytical funcionando con la siguiente configuración: θ 2 θ de 10° a 90° con tamaño de paso de 0.02° , radiación monocromática $\text{CuK}\alpha$ de longitud de onda $\lambda = 1.5409 \text{ \AA}$, 45 kV y 40 mA.

Los ensayos de tensión se realizaron antes y después del proceso de deformación usando una máquina universal de ensayos marca HUNG-TA modelo HT. Se utilizaron muestras a lo largo del eje longitudinal de sección circular de 6 mm de diámetro y 24 mm de longitud libre entre mordazas, siguiendo la norma ASTM E8/E8M-11, en la cual se indica que la longitud libre entre mordazas debe ser cuatro veces el diámetro de la sección circular. Los datos se obtuvieron realizando ensayos a una velocidad de 5 mm/min y se presenta el promedio de tres medidas. La microdureza Vickers se midió usando un durómetro marca Bowers modelo Esseyway 600 utilizando una carga de 50 kg-F y un tiempo de 20 s. Los valores presentados son el promedio de 30 medidas que se tomaron sobre la superficie de muestras tomadas del plano Y, en concordancia con las medidas de difracción de rayos X.

Resultados

En los patrones de difracción para las muestras antes y después del proceso ECAP con diferente número de pasadas solo se observa ferrita debido a la baja fracción en volumen de perlita en este acero, en las orientaciones (110, 200, 211), de acuerdo a la base de datos JCPDS 00 006 0696 (Figura 1). No se observan transformaciones de fase después del proceso ECAP. Sin embargo, se presentan cambios en la intensidad

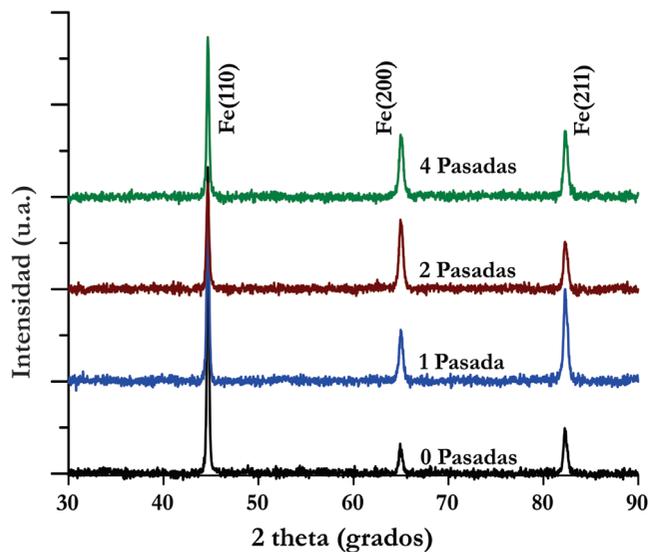


Fig. 1. Patrones XRD para las muestras antes y después del proceso ECAP.

de los picos y en las orientaciones incluso después de la primera pasada (Gholinia et al. 2000), lo que podría indicar que se produce un refinamiento de la estructura como consecuencia de la subdivisión de los granos de Fe (110), lo que produciría granos más finos en las orientaciones (200, 211).

El ensanchamiento de los picos presentado para el pico Fe (110) y Fe (200) puede atribuirse también al refinamiento de la estructura en esta orientación (Figura 2). Se observa (Figura 2a) que la intensidad del pico (110) disminuye después de la primera pasada mientras que la intensidad del pico (200) aumenta, lo que podría atribuirse a la subdivisión de granos de Fe (110) y la formación de nuevos granos en la dirección (200). Se notó el mismo efecto en la orientación (211).

Con el fin de evaluar el refinamiento de la estructura, se calculó el tamaño de cristalito promedio, D , usando la fórmula de Scherrer y el ancho del pico a la mitad de la altura (FWHM – Full Width at Half Maximum) para cada una de las pasadas. La técnica de difracción de rayos X se utiliza para determinar el tamaño de cristalito, ya que muchas propiedades de los materiales dependen de éste, y su tamaño no siempre coincide con el tamaño de partícula o de grano medido por otras técnicas (Uvarov & Popov 2013). La fórmula de Scherrer usada para calcular el tamaño de cristalito (Ecuación 1).

$$B = \frac{K\lambda}{L \cos \theta} \quad (1)$$

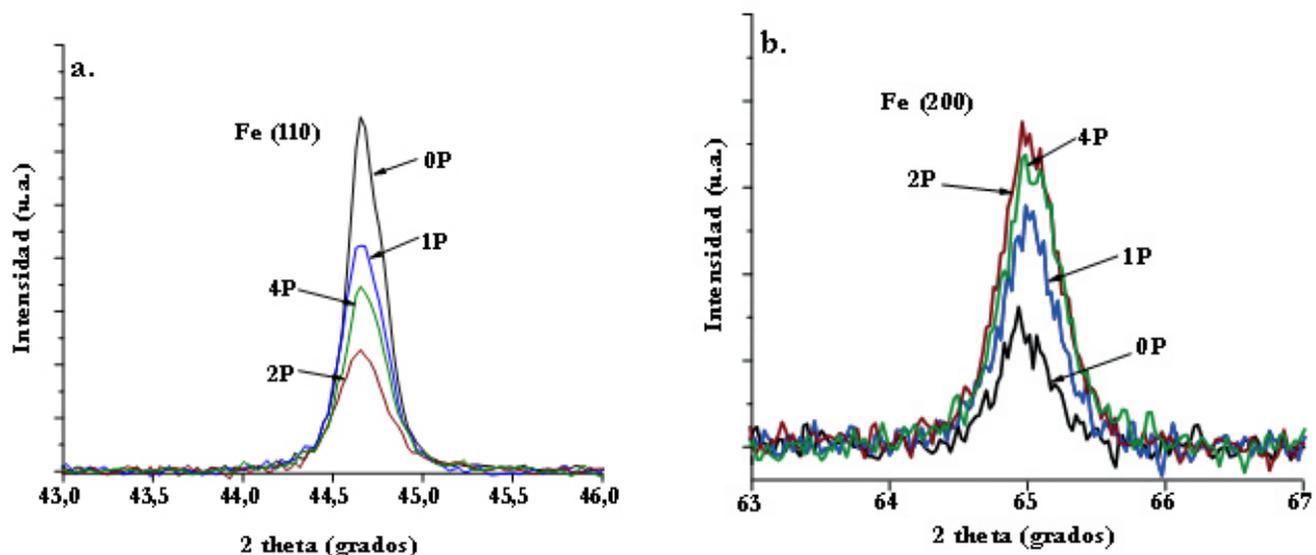


Fig. 2. Patrones XRD detallados para los picos. a. Fe (110) y b. Fe (200). 0P: 0 pasadas, 1P: 1 pasada, 2P: 2 pasadas, 4P: 4 pasadas.

Donde: B es el tamaño de cristalito aparente, λ es la longitud de onda de la radiación, L es el ensanchamiento del pico (en radianes) y θ es el ángulo de Bragg. K es una constante adimensional del orden de la unidad conocida como constante de Scherrer, y su valor depende de la forma del cristalito y de la distribución de tamaños de cristalito, siendo la forma esférica con simetría cúbica la más comúnmente utilizada tomando un valor de $K = 0.94$. El tamaño de cristalito calculado a través de la fórmula de Scherrer generalmente es diferente al tamaño de partícula o tamaño de grano, ya que partículas o granos individuales pueden contener varios cristalitos, o dominios con diferentes orientaciones (Uvarov & Popov 2013). Por otro lado, el tamaño de cristalito en los metales procesados por SPD obtenido por difracción de rayos X es equivalente al tamaño medio de los dominios que dispersan los rayos de forma coherente. Como consecuencia, la difracción de rayos X diferencia subgranos incluso si las desorientaciones entre ellos son muy pequeñas (Gubicza et al. 2005).

Los resultados obtenidos para el tamaño de cristalito, indican un refinamiento de la estructura especialmente en la orientación Fe (110; **Tabla 1**).

Tabla 1. Tamaño de cristalito calculado para la fase ferrita.

Orientación	Número de pasadas	Tamaño de cristalito (nm)
110	0	83,06
	1	68,47
	2	61,50
	4	69,00
200	0	41,60
	1	41,10
	2	37,15
	4	38,58
211	0	47,94
	1	45,54
	2	42,15
	4	44,85

La microestructura del acero calibrado consiste de granos de ferrita y colonias de perlita en contraste claro (**Figura 3a**). Después de la primera pasada se observa la deformación de la microestructura, posiblemente por la subdivisión de los granos de ferrita y perlita. La microestructura de los aceros de bajo carbono procesados con ECAP se caracteriza por colonias de perlita subdivididas y granos de ferrita ultrafinos con alta densidad de dislocaciones de red (Gubicza et al. 2005).

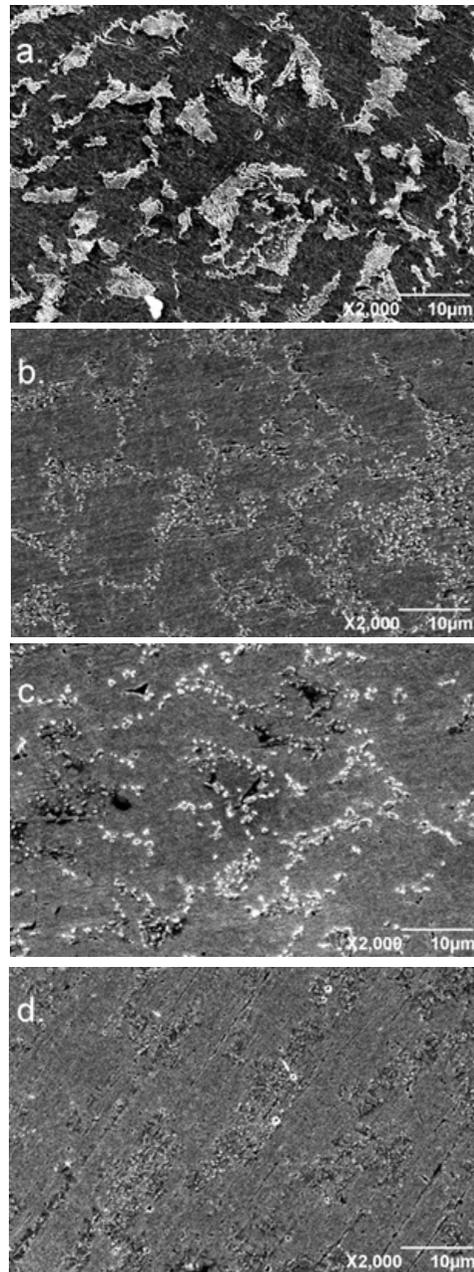


Fig. 3. Imágenes SEM de las muestras antes y después del proceso ECAP. **a.** 0 pasadas, **b.** 1 pasada, **c.** 2 pasadas, **d.** 4 pasadas.

La resistencia a la tensión inicial del acero calibrado se encuentra en el rango reportado para el acero AISI 1016 calibrado. La resistencia a la tensión aumenta hasta después de la segunda pasada, sin embargo, después de la cuarta pasada cae a un valor por debajo del valor inicial (Figura 4).

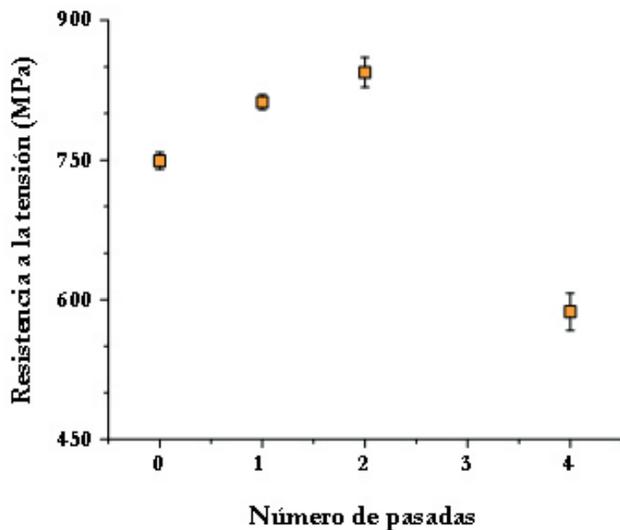


Fig. 4. Variación en la resistencia a la tensión después del proceso ECAP.

La dureza Vickers para el estado inicial es de nuevo comparable con los valores del acero calibrado, y aumenta gradualmente con el número de pasadas (Figura 5).

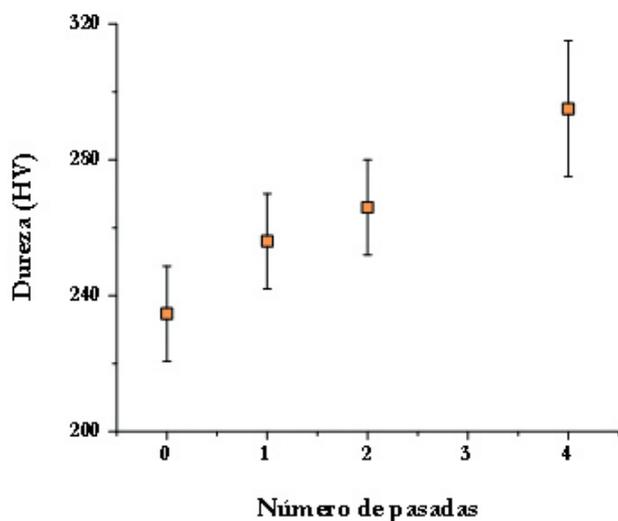


Fig. 5. Variación en la dureza después del proceso ECAP.

Discusión

Los resultados obtenidos por medio de DRX indican que es posible un refinamiento de los cristalitas de ferrita en baja extensión incluso después del proceso de calibrado. Durante el proceso ECAP, los granos son refinados debido a la gran deformación plástica impuesta en cada pasada, y para el caso en particular estudiado se espera que la ferrita, más blanda que la perlita, experimente una mayor deformación plástica en su microestructura (Al-Abbasi 2013). Además, en las primeras pasadas de ECAP se espera que la ferrita sea refinada por la subdivisión sucesiva de las paredes de dislocaciones debido a la operación de múltiples sistemas de deslizamiento (Chen et al. 2012). Los resultados obtenidos para el tamaño de cristalito (Tabla 1), indican un refinamiento de la estructura especialmente en la orientación Fe (110), que disminuyó a 69 nm en comparación a 83 nm para el acero en su estado inicial. Estos valores para el tamaño de cristalito están de acuerdo con valores reportados para aceros de bajo carbono (Liu et al. 2001, Suzuki et al. 2009) y Hierro (Tao et al. 2002), y también para otros metales sometidos a diferentes técnicas de deformación plástica severa tales como aluminio (Chang et al. 2001) y aleaciones de aluminio (Bera et al. 2013).

Las imágenes de SEM indican que después de dos pasadas la perlita se distorsiona severamente por la imposición de una deformación muy alta, lo que se debe probablemente a que en los procesos de deformación plástica severa, la alta deformación impuesta produce que una proporción sustancial de la cementita perlítica se disuelva aun a temperatura ambiente (Hong et al. 1999, Vodopivec et al. 2007). Este efecto en el caso particular de estudio se debe a que se parte de un acero calibrado que ya ha sido sometido a una deformación plástica inicial, y por lo tanto al aplicar el proceso de ECAP el acero es deformado más severamente. El alto grado de deformación causa que la mayoría de la perlita se desintegre después de sólo dos pasadas (Shin & Park 2005, Jozef et al. 2010). La formación de partículas de cementita observada resulta de la disolución de carbono de la cementita perlítica por el proceso de deformación plástica severa. Después de 4 pasadas la perlita es más severamente distorsionada y no se observan fronteras de grano o detalles microestructurales. En este punto la disolución del

carbono de la cementita se vuelve más considerable y se espera que haya carbono en exceso en la fase ferrita (Park & Shin 2002).

En el ensayo de tensión se observó un aumento en la resistencia a la tensión después de la primera pasada lo que puede deberse al leve refinamiento presentado en la estructura, especialmente en la ferrita. Sin embargo, el aumento en la resistencia a la tensión no es comparable con los valores obtenidos al procesar un acero de bajo carbono en estado recocido con ECAP (Marulanda et al. 2013), en el que se puede alcanzar hasta 3 veces el valor inicial. Después de dos pasadas se produce un aumento adicional en la resistencia a la tensión, sin embargo, después de cuatro pasadas, éste cae a un valor por debajo del inicial. Esta disminución en la resistencia a la tensión puede atribuirse a la fragmentación de las partículas de cementita, lo que produce que la perlita pierda partículas y por lo tanto que haya menos obstáculos para el deslizamiento. De acuerdo a esto, la disminución en la resistencia a la tensión estaría principalmente influenciada por la dispersión de las partículas de cementita más que por la formación de subgranos. Por otro lado, la deformación severa a la que se ha sometido el acero en los procesos de calibrado y posterior ECAP podría tener un efecto negativo ya que se pueden producir daños locales tales como micro-grietas y múltiples sitios de iniciación de grietas debido al procesamiento severo de deformación (Pang et al. 2012), lo que afecta considerablemente la resistencia a la tensión del acero calibrado después de cuatro pasadas. Por otro lado, el endurecimiento en frío o “strain hardening” del metal producido al aumentar la deformación, hace que el acero se aproxime a la fragilidad. Ya que el material en este punto tiene menos capacidad de deformarse plásticamente, es más probable que se produzca la fractura del material. Estos resultados están de acuerdo con los reportados por otros autores (Raji & Oluwole 2013).

El comportamiento presentado para la variación en la resistencia a la tensión, especialmente en la cuarta pasada en la que cae drásticamente, no es el esperado para materiales deformados en frío en los que aumenta el número de obstáculos para el deslizamiento y por lo tanto, la resistencia a la tensión. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el acero estudiado ya ha sido deformado en frío muy severamente, las partículas de cementita se han fragmentado y esto causaría que el comportamiento no sea el usual.

El aumento presentado en la dureza se atribuye a la disminución en el tamaño de cristalito, y para la cuarta pasada, a la formación de partículas de cementita resultante de la disolución de carbono que se vuelve más considerable con el aumento de la deformación (Shin et al. 2002), tal como se observa en la figura 3. La distribución de estas partículas de cementita, más dura que la ferrita, produce el aumento en la dureza, en tanto que esta misma disolución de partículas produce que haya menos obstáculos para el deslizamiento, produciéndose la disminución en la resistencia a la tensión.

Conclusión

Se presenta la aplicación de la técnica de presión en canal angular de sección constante (ECAP) a un acero de bajo carbono, AISI 1016, en estado calibrado, con el fin de evaluar la posibilidad de mejorar sus propiedades mecánicas después del proceso de calibrado. Los resultados muestran que es posible mejorar la resistencia a la tensión hasta después de dos pasadas en el proceso ECAP. Sin embargo, después de cuatro pasadas, cuando la deformación impuesta sobre el acero es demasiado severa teniendo en cuenta el estadio inicial de calibrado, la resistencia a la tensión disminuye incluso a un valor que se encuentra por debajo del valor inicial. Esto se debe a que deformaciones demasiado altas causan en este tipo de acero la disolución de la cementita perlítica formando partículas de cementita y un exceso de carbono en la fase ferrita. La distribución de estas partículas de cementita, más dura que la ferrita, produce el aumento en la dureza, en tanto que esta misma disolución de partículas produce que haya menos obstáculos para el deslizamiento, dándose la disminución en la resistencia a la tensión. Ya que el refinamiento presentado en la estructura es leve, la variación en las propiedades mecánicas se atribuye principalmente a la dispersión de partículas de cementita. Sin embargo, debido a que el comportamiento de la resistencia a la tensión no es el usual para aceros deformados en frío, esto podría ser objeto de futuras investigaciones, apoyadas en técnicas como EBSD (Electron Backscatter Diffraction) o TEM (Transmission Electron Microscopy).

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico de la Universidad Antonio Nariño para el desarrollo de

esta investigación por medio del proyecto “Aceros nanoestructurados obtenidos por deformación plástica severa”, proyecto número 2011-242.

Conflicto de intereses

Este trabajo no presenta conflicto de intereses.

Referencias

- Al-Abbasi FM (2013) Predicting the deformation behavior of ferrite-pearlite steels using micro mechanical modeling of cells. *Mechanics of Materials* 63:48-64
- Atienza JM, Martínez-Pérez ML, Ruiz-Hervías J, Mompeán F, García-Hernández M, et al. (2005) Residual stresses in cold drawn ferritic rods. *Scripta Materialia* 52:305-309
- Bera S, Chowdhury SG, Estrin Y, Manna I (2013) Mechanical properties of Al7075 alloy with nano-ceramic oxide dispersion synthesized by mechanical milling and consolidated by equal channel angular pressing. *Journal of Alloys and Compounds* 548:257-265
- Chang JY, Kim GH, Moon IG (2001) X-ray diffraction analysis of pure aluminum in the cyclic equal channel angular pressing. *Scripta Materialia* 44:331-336
- Chen L, Yuan FP, Jiang P, Wu XL (2012) Mechanical properties and nanostructures in a duplex stainless steel subjected to equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A* 551:154-159
- Fan ZQ, Hao T, Zhao SX, Luo GN, Liu CS, et al. (2013) The microstructure and mechanical properties of T91 steel processed by ECAP at room temperature. *Journal of Nuclear Materials* 434:417-421
- Gholinia A, Prangnell PB, Markushev MV (2000) The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAE. *Acta Materialia* 48:1115-1130
- Gubicza J, Balogh L, Hellmig RJ, Estrin Y, Ungár T (2005) Dislocation structure and crystallite size in severely deformed copper by X-ray peak profile analysis. *Materials Science and Engineering A* 400-401:334-338
- Hong MH, Reynolds WD, Tarui T, Hono K (1999) Atom Probe and Transmission Electron Microscopy investigations on heavily drawn pearlitic steel wire. *Metallurgical and Materials Transactions A* 30A:717-727
- Iczler M, Tabur M (2006) Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel. *Wear* 260:90-98
- Jozef Z, Sergey DV, George R, Martin F, Libor K (2010) Ultrafine grained structure development in steel with different initial structure by severe plastic deformation. *Matéria* 15 (2):240-246
- Langdon TG (2008) Processing of ultrafine-grained materials using severe plastic deformation: potential for achieving exceptional properties. *Revista de Metalurgia* 44:556-564
- Liu G, Wang SC, Lou XF, Lu J, Lu K (2001) Low carbon steel with nanostructured surface layer induced by high-energy shot peening. *Scripta Materialia* 44:1791-1795
- Marulanda DM, Cortés JG, Pérez MA, García G (2013) Microstructure and Mechanical Properties of AISI 8620 Steel Processed by ECAP. Proceedings of the XXII International Materials Research Congress, MRS Proceedings
- Pang JC, Yang MX, Yang G, Wu SD, Li SX, et al. (2012) Tensile and fatigue properties of ultrafine-grained low-carbon steel processed by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A* 553:157-163
- Park KT, Shin DH (2002) Annealing behavior of submicrometer grained ferrite in a low carbon steel fabricated by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering A* 334:79-86
- Raji NA, Oluwole OO (2011) Influence of degree of cold-drawing on the mechanical properties of low carbon steel. *Materials Science and Applications* 2:1556-1563
- Raji NA, Oluwole OO (2013) Mechanical properties of cold-drawn low carbon steel for nail manufacture: experimental observation. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5:118-122
- Selçuk B, Ipek R, Karamiş MB (2003) A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels. *Journal of Materials Processing Technology* 141:189-196
- Shin DH, Pak JJ, Kim YK, Park KT, Kim YS (2002) Effect of pressing temperature on microstructure and tensile behavior of low carbon steels processed by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A* 323:409-415
- Shin DH, Park KT (2005) Ultrafine grained steels processed by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A* 410-411:299-302
- Suzuki T, Tomota Y, Moriai A, Tashiro H (2009) High tensile strength of low-carbon ferritic steel subjected to severe drawing. *Materials Transactions* 50:51-55
- Tao NR, Wang ZB, Tong WP, Sui ML, Lu J, Lu K (2002) An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment. *Acta Materialia* 50:4603-4616
- Uvarov V, Popov I (2013) Metrological characterization of X-ray diffraction methods at different acquisition geometries for determination of crystallite size in nano-scale materials. *Materials Characterization* 85:111-123
- Vodopivec F, Kmetič D, Tehovnik F, Tuma JV (2007) Structural steels with micrometer grain size: a survey. *Materials and technology* 41:111-117

Zhu YT, Lowe TC, Langdon TG (2004) Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia* 51:825-830

Microestructura y propiedades mecánicas del acero AISI 1016 calibrado procesado por ECAP

Resumen. Se utilizó el proceso de presión en canal angular de sección constante para deformar un acero de bajo carbono calibrado, con el fin de evaluar microestructura y propiedades mecánicas. A su vez, se identificó la posibilidad de mejorar propiedades más allá del proceso de calibrado. El material utilizado fue un acero de bajo carbono calibrado de composición 0.16 % C, 0.8 % Mn, 0.2 % Si, 0.02 % P, 0.012 % S y balance Fe. El proceso se realizó a temperatura ambiente con cuatro pasadas usando la ruta B_c, con una deformación equivalente de ~0.6 en cada pasada. Se estudió la evolución de la estructura antes y después de la deformación usando microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X y se evaluaron las propiedades mecánicas de microdureza y resistencia a la tensión. Se encontró un aumento leve de las propiedades mecánicas al aumentar el número de pasadas en el proceso. Los análisis mostraron cambios en la estructura ferrítica-perlítica original a través del refinamiento de los granos de ferrita y la deformación de la perlita.

Palabras clave: Presión en canal angular de sección constante; ECAP; acero de bajo carbono; refinamiento de estructura; resistencia a la tensión; microdureza.

Microestrutura e propriedades mecânicas do aço AISI 1016 calibrado processado por ECAP

Resumo. Utilizou-se o processo de pressão em canal angular de seção constante para deformar um aço de baixo carbono calibrado, com a finalidade de avaliar microestruturas e propriedades mecânicas. Assim, identificou-se a possibilidade de melhorar propriedades para além do processo de calibração. O material utilizado foi um aço de baixo carbono calibrado com a seguinte composição 0.16% C, 0.8% Mn, 0.2% Si, 0.02% P, 0.012% S e balance Fe. O processo realizou-se à temperatura ambiente com quatro passos utilizando a rota B_c, com uma deformação equivalente de ~0.6 em cada passo. Estudou-se a evolução da estrutura antes e depois da formação utilizando microscopia eletrônica de varrimento e difração de raios X e avaliaram-se as propriedades mecânicas de microdureza e resistência à tensão. Encontrou-se um aumento ligeiro das propriedades mecânicas ao aumentar o número de passos no processo. As análises mostraram alterações nas estruturas ferrítica-perlítica original a através do refinamento dos grãos de ferrita e a deformação da perlita.

Palavras-chave: Pressão em canal angular de seção constante; ECAP; aço de baixo carbono; refinamento de estrutura; resistência à tensão; microdureza.