

COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DEL ACERO AISI 1045 ENDURECIDO EN FRÍO Y TRACCIONADO

TOMÁS FERNÁNDEZ COLUMBIÉ¹, ESTHER FERNÁNDEZ GUILARTE; ISNEL RODRÍGUEZ GONZÁLEZ,
DAYANIS ALCÁNTARA BORGES, RAMÓN CASTILLO MATOS

¹Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín. Las Coloradas s/n, Moa, Holguín, Cuba. CP 83 329. Tel. 53 24 6 4476, Fax. 53 24 6 2290

tfernandez@ismm.edu.cu, efguilarte@ismm.edu.cu, irgonzalez@ismm.edu.cu, dalcantara@ismm.edu.cu, rcastillom@ismm.edu.cu

Recibido: abril 2012

Recibido en forma final revisado: junio 2013

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento del acero AISI 1045 sometido a deformado en frío con el empleo de rodillo simple y luego traccionado. Se analiza el efecto de las imperfecciones cristalinas del material después de ser sometido a ambos procesos de deformación y tracción. El diseño de experimento contempla las variables empleadas en el proceso de deformación, las cuales están relacionadas con la fuerza, el avance y el número de revoluciones. Se determina en las microestructuras observadas, las imperfecciones en la estructura metalográfica con la reducción del tamaño promedio de los granos producto de los efectos combinados de deformación tracción. Las probetas para la deformación plástica se prepararon según se establece para el ensayo de tracción tradicional; en este caso, la superficie se endureció con un rodillo hasta lograr una dureza según fueron cambiadas las variables del proceso. La observación metalográfica se hizo posible a través del encapsulado de las muestras ya que las mismas son de pequeños tamaños.

Palabras clave: Microestructura, Deformación en frío, Deformación plástica, Encapsulado, Rodillo simple.

MICROSTRUCTURAL BEHAVIOUR OF THE STEEL AISI 1045 HARDENED AND STRESSED IN COLD CONDITIONS

ABSTRACT

In this paper the analysis of the behaviour of the AISI 1045 steel subjected to cold deformation by using a simple roller and then stressed, is carry out. It is also analyzed the effect of crystalline imperfections of this alloy being subjected to hardened and both processes of deformation and traction. The experimental design takes into account the variables employed in the deformation process, which are related to the force, the displacement and the number of revolutions. The imperfections in the metallographic structure are determined by microscopic observation which allows assessing the reduction of the average size of grains due to the combined effects of the deformation and traction. The test tubes for the deformation were prepared as indicated for traditional traction tests. In this study the surface was hardened using a roller until achieving the specific hardness due to the changes on process variables. The metallographic observation became possible through the encapsulation of samples, due to their small sizes.

Keywords: Microstructure, Cold deformation, Plastic deformation, Encapsulated, Simple roller.

INTRODUCCIÓN

El ensayo de tensión se realiza frecuentemente para determinar ciertas propiedades mecánicas en los aceros. Si las fuerzas son mayores, el material se comporta de una manera plástica. Cuando se incrementa el esfuerzo, las dislocaciones empiezan a producirse, ocurre el deslizamiento y el material empieza a deformarse plásticamente. Se han referido en varios trabajos (Bridgman, 1944; Goicolea *et al.* 1996; Aparicio *et al.* 2007), el comportamiento del acero

sometido a ensayos de tensión; sin embargo en la literatura especializada aún no aparecen reportes del comportamiento del acero AISI 1045 endurecido superficialmente por rodillo simple y luego sometido a ensayo de tracción.

Según Fernández *et al.* (2012), la deformación plástica superficial en frío es un método de endurecimiento de materiales que logra alta dureza, pues el aumento del grado de deformación está vinculado con la aparición del fenómeno de endurecimiento y a medida de que el grado

de deformación es mayor, son necesarias más tensiones para continuar deformando. El aumento del grado de deformación en frío aumenta la resistencia del metal a la deformación.

La deformación plástica por rodillo, es un proceso de elaboración en frío en la superficie de una pieza. La pequeña deformación plástica superficial originada por la operación, consiste en el desplazamiento del material de los picos o crestas a los valles o depresiones de las microirregularidades superficiales (Rose, 2000). El flujo ocurre bajo una fuerza controlada del rodillo que excede el punto de fluencia del material de la superficie de la pieza no endurecida, creándose una capa de metal consolidada que provoca el aumento de las propiedades en la superficie. El proceso debe aplicarse preferentemente después del torneado (Gabb *et al.* 2002).

En consideración con los criterios de Álvarez *et al.* (2004) quienes plantean que la deformación plástica en frío de un agregado policristalino por un proceso cualquiera conformado por laminación, estirado, trefilado, embutición, plegado, enderezado, suele traducirse en una deformación permanente ya que la misma tiene lugar en el interior de los cristales con la acomodación de las juntas de los granos.

Lo anterior está relacionado con el fenómeno de la acritud que es una propiedad característica del estado metálico que no presentan los polímeros ni los materiales cerámicos, el material resultará más duro cuanto menor sea el espesor final; es decir, cuanto mayor haya sido la reducción en frío (Belozarov *et al.* 2006).

Considera Pero-Sanz (2000) que en la mayoría de los aceros es ampliamente aceptada la idea de que durante el proceso de deformación más de un sistema de deslizamiento es activado simultáneamente, y que la activación de un sistema implica una mayor dificultad en la activación del resto. Las principales variables que afectan el endurecimiento son: la densidad de dislocaciones, vacancias, texturas cristalográficas, temperatura.

Diferentes orientaciones cristalinas del grano contribuyen a la activación de un determinado conjunto de sistemas de deslizamiento. Los sistemas activos determinan los valores de deformación y tensión locales del grano y consecuentemente la deformación y tensión a nivel macroscópico, lo cual a su vez modifica el valor de la deformación límite del material (Moreno, 2009).

Por otro lado, afirma Mazein *et al.* (2001) que para correlacionar las propiedades de un material con su

microestructura debe tenerse en consideración un gran número de variables. Una de las más importantes es el proceso de fabricación, expone además que un determinado material no posee unas propiedades mecánicas únicas, sino todo un rango de valores correspondientes a diferentes métodos de fabricación.

Plantea Alcántara *et al.* (2008) que los procesos de conformado que implican deformación plástica del material, sean en frío o en caliente, producen un alineamiento de los ejes cristalográficos de los granos en una orientación preferente, es decir, una textura cristalográfica.

Rose (2000) ha demostrado la influencia de las propiedades del material en el proceso de deformación, la dureza, el endurecimiento por deformación, la ductilidad y la inestabilidad metalúrgica, al considerar que la resistencia a la deformación plástica determina el nivel de tensión del material deformado plásticamente.

La selección del acero AISI 1045 se fundamenta en que la característica más sobresaliente es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. La aleación AISI 1045 contiene entre el 0,45 % y 0,5 % de carbono, lo que posibilita que al someter a proceso de compresión, conduce a un nuevo estado estructural y brinda nuevas propiedades (Fernández *et al.* 2010), posee alta resistencia, plasticidad y viscosidad, en combinación con excelentes propiedades de ingeniería, presenta una fácil maquinabilidad, se elabora fácilmente por presión (laminado, forjado, estampado) o por corte y baja tendencia a las deformaciones y a la formación de grietas durante el temple.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

2.1. Preparación de las probetas para el ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó empleando una máquina CRITM DNS 200, la misma presenta una carga de 200 kN. La carga que se aplicó fue con desplazamientos hasta la rotura, a una velocidad de 1 mm/min) considerando la dureza de cada una de las muestras. A lo largo del proceso de estiramiento se tomaron medidas del diámetro del cuello en la sección central, con un calibre Vernier de precisión $\pm 0,05$ mm.

Para realizar el ensayo de tracción, se escogieron 28 probetas de acero AISI 1045, con longitud de 120 mm y de diámetro 11 mm (Goicolea *et al.* 1996; Altenberger, 2006),

una sin deformar y 27 deformadas por rodadura para luego ser traccionada.

Se comprobó experimentalmente mediante ensayos metalográficos el comportamiento microestructural en el cuello de las muestras del proceso de deformación tracción, se seleccionaron nueve muestras de las 27 analizadas, que según González-Castellanos (2000), este procedimiento se realiza cuando la población seleccionada, representa el 30 % o un por ciento superior con respecto al total de las muestras estudiadas. En la Tabla 1 aparece el diseño de experimento propuesto de la forma en que se desarrolló el proceso.

Tabla 1. Matriz de experimentos para observación de las muestras endurecidas y traccionadas

Niveles	Factores		
	n (rev/min)	P (N)	S (mm/rev)
(-1)	27	500	0,075
(Δ)	54	1 500	0,125
(+1)	110	2 500	0,25
Muestra			
1a	27	500	0,075
1b	27	500	0,125
1c	27	500	0,25
2a	54	1500	0,075
2b	54	1500	0,125
2c	54	1500	0,25
3a	110	2500	0,075
3b	110	2500	0,125
3c	110	2500	0,25

El corte se realizó en un torno 16D20 y cuchilla con sujeción mecánica Sandvik, código del vástago PSSN R 25 25 M 12, una plaquita T – MAX – CUT 12 04 12 de calidad T 025 20 (Coromant corokej, 1996), para luego someterla al proceso de pulido.

El pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio cambiando el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro, para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

Para el acabado final se utilizó un paño de fieltro grueso, usando como sustancia abrasiva, el óxido de cromo. Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro, se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl₄C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir, se emplearon las técnicas de ataque manual por inmersión y ataque químico.

Se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante cinco segundos con el reactivo nital, al cuatro por ciento (mezcla de cinco mL de ácido nítrico (HNO₃) y 100 mL de alcohol etanol).

En la preparación de muestras, por ser pequeñas y de difícil manejo en las operaciones de desbaste y pulido, se encapsularon y se montaron en un material adecuado para hacer posible la preparación, como se observa en la Figura 1. Para el encapsulado de las muestras se empleó resina epoxi.



Figura 1. Encapsulado de las muestras para el análisis metalográfico

La asignación de la letra P significa muestra patrón, traccionada y sin deformar, la numeración desde el uno hasta el nueve son las diferentes muestras deformadas y traccionadas. Las muestras en esta figura están identificadas dentro del círculo pequeño, el área restante es el volumen de resina empleado en la cápsula.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar el análisis microestructural de las nueve muestras, se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas. Todas las muestras fueron observadas a 200 X.

Las Figura 2a, b, c y d relacionan el comportamiento de las muestras deformadas y luego traccionadas, el comportamiento es para fuerza de 500 N; 27, 54 y 110 rev/min y avances de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev respectivamente.

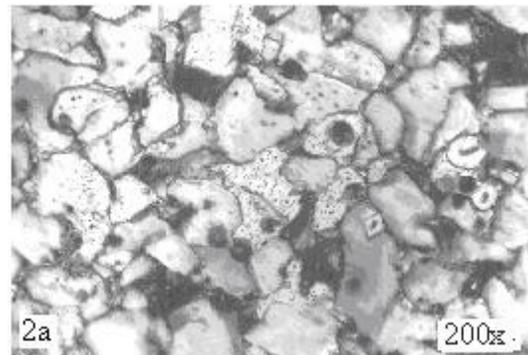


Figura 2a. Centro de la muestra sin deformar

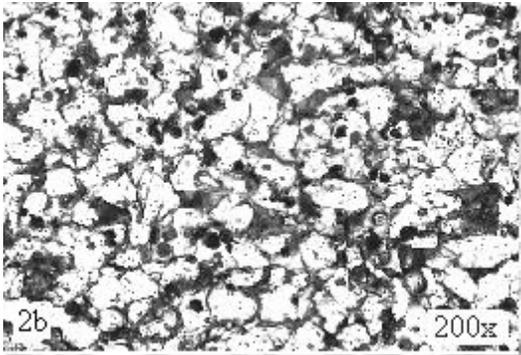


Figura 2b. Muestra deformada con avance de 0,075 mm/rev y 27 rev/min

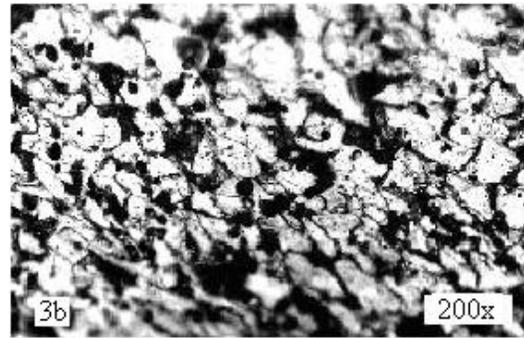


Figura 3b. Muestra deformada con avance de 0,075 mm/rev y con 27 rev/min

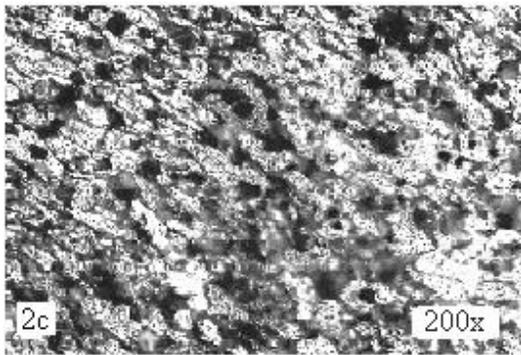


Figura 2c. Muestra deformada con avance de 0,125 mm/rev y con 54 rev/min

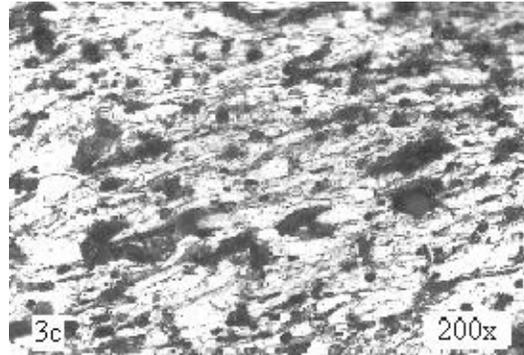


Figura 3c. Muestra deformada con avance de 0,125 mm/rev y con 54 rev/min

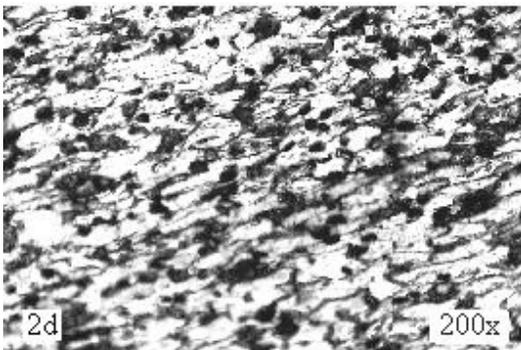


Figura 2d. Muestra deformada con avance de 0,25 mm/rev y con 110 rev/min

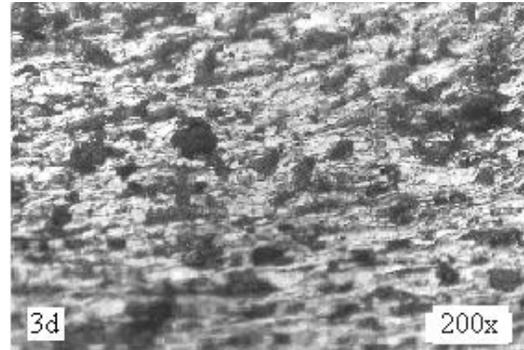


Figura 3d. Muestra deformada con avance de 0,25 mm/rev y con 110 rev/min

En las muestras se presenta una microestructura formada por granos de ferrita y perlita, en la cual los granos se van agrupando producto del proceso de deformación tracción, se muestra que la textura cristalográfica, en relación con la textura inicial presenta un reordenamiento de los granos, casi de forma equiaxial, sin embargo para las Figuras 2c y 2d, los granos presentan formas alargadas, lo cual a su vez modifica el valor de la deformación límite del material.

Las muestras deformadas con fuerza de 1500 N; con número de revoluciones de 27, 54 y 110 rev/min y avance del rodillo de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev, se muestran en las Figuras 3b, 3c y 3d.

Para fuerza de 1500 N, se puede apreciar una mayor agrupación de granos en la estructura, con respecto a la fuerza de 500 N en el valor de la deformación, el efecto de la textura es más relevante en la proximidad de la zona correspondiente a la deformación.

Para las muestras deformadas con la aplicación de esta fuerza, el hecho de tener una textura con una gran fracción de volumen de orientaciones distribuidas aleatoriamente, el proceso de deformación – tracción hace que la distribución de los granos sea más pequeña. La diferencia en los valores de deformación en la muestra 3b, 3c y 3d, está relacionada particularmente con la mayor participación relativa en la textura de las orientaciones.

Las Figuras 4b; 4c y 4d, se corresponden con la fuerza de 2 500 N; 27, 54 y 110 rev/min y avances de 0,075; 0,125 y 0,25 mm/rev.

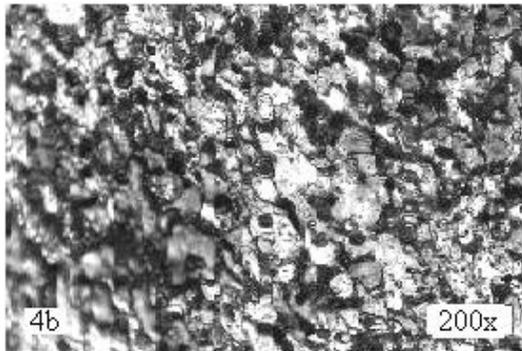


Figura 4b. Muestra deformada con avance de 0,075 mm/rev y con 27 rev/min

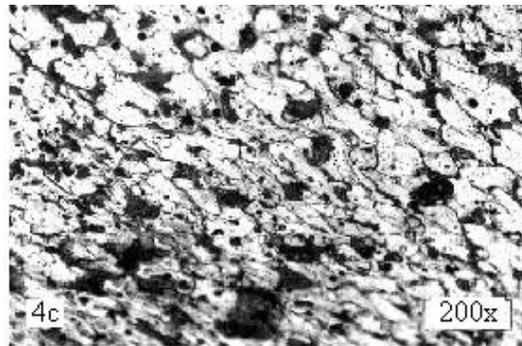


Figura 4c. Muestra deformada con avance de 0,125 mm/rev y 54 rev/min

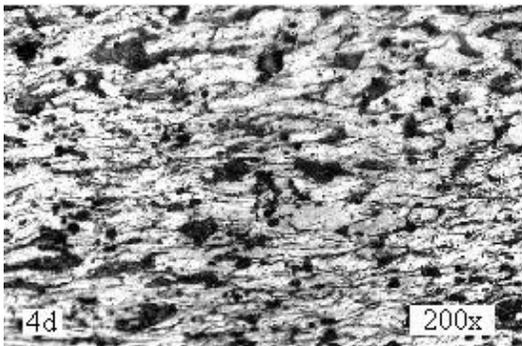


Figura 4d. Muestra deformada con avance de 0,25 mm/rev y con 110 rev/min

Para fuerza de 2 500 N se observa una mayor disminución del grano, las muestras siguen manteniendo una misma estructura, pero más densa con un mejor acomodamiento de los granos. La deformación plástica es acomodada por deslizamiento, ya que la activación de los diferentes sistemas de deslizamiento está fuertemente asociada con las tensiones críticas de activación.

En consecuencia, la anisotropía plástica dependerá de la relación entre los valores de deformación introducidos.

Los resultados son compatibles con el conocimiento de que el trabajado mecánico aumenta las deformaciones y que relacionan la textura cristalográfica con la anisotropía plástica planar y normal del material y con la aptitud al conformado (Signorelli *et al.* 2006).

3.1 Análisis de la microdureza

Para determinar la microdureza en las muestras deformadas, se realizó según el proceso de deformación, en correspondencia con las magnitudes de fuerza, avance y número de revoluciones empleados, para ello se efectuaron tres ensayos a cada muestra, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Mediciones de microdureza

Muestras	Salidas			Media
	HV1	HV2	HV3	HV
1a	204	207	206	206
1b	205	207	206	206
1c	205	207	207	207
2a	316	317	316	316
2b	318	316	317	317
2c	318	319	321	319
3a	436	434	435	435
3b	446	444	446	445
3c	457	457	457	457

Los resultados obtenidos en la microdureza guardan relación con el comportamiento microestructural, se puede observar que en la medidas que fueron introducidas las variables Fuerza (P), avance (S) y número de revolución (n) y éstas se incrementaron, los granos del material se fueron deformando y apilándose dando lugar a que la superficie del material se endureciera, la dureza se incrementó de 206 hasta 457 HV.

El endurecimiento del material no ocurre por el cambio de fase, para un acero de red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) como el acero AISI 1045, presenta buenos planos de deslizamiento, puede endurecer en frío. Se puede plantear que el mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045 está motivado por dos causas:

1. Al ser sometido al proceso de deformación superficial por rodillo, que provoca la acritud por tensiones de compresión.
2. Al ser traccionado, provoca la aparición de acritud motivado por las tensiones de tracción.

CONCLUSIONES

1. La capacidad de endurecimiento (H) tiene un comportamiento creciente en la misma medida de que se incrementan las variables del proceso de experimentación (n; S, y P), al incrementar las tensiones de compresión surge un estado tensional que lo deforma, incrementando su dureza final.
2. Después de ser sometidas a la acción de cargas por rodadura y traccionadas en las muestra se notan vestigios de deformación plástica, con bloques de la estructura en mosaico divididos en pequeñas proporciones y una deformación clara de la red cristalina
3. El incremento de la dureza en las probetas de 206 a 457 HV, a partir de un valor inicial promedio igual a 170 HB en las probetas patrón, se produce entre otras causas, por la reducción que provoca en el tamaño del grano la acción de las cargas por rodadura.

AGRADECIMIENTOS

A Juan Ramón Castillo Matos, técnico del laboratorio de Ciencias de los Materiales del instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÁNTARA, D., FERNÁNDEZ, T., RODRÍGUEZ, I. (2008). Comportamiento de las capas deformadas por rodadura en los equipos de laboreo minero. *Revista Nexo* 21 (01) pp 26 – 32
- ALTENBERGER, I. (2006). Deep rolling, the past, the present and the future. *Engineering Monchebergstrasse* 3 (34) pp 125 – 132.
- ÁLVAREZ, E., LANCESTREMER, J., MAREGLIA, J., BARR, J. (2004). Fundamentos de la trafilación en aceros al carbono. *Revista de Ingeniería*, 20 (2) pp 69 – 76.
- APARICIO, G., D' ARMAS, H., CIACCIA, M. (2007). Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A – 569. *Revista Ingeniería UC*. 14 (1) pp 57 – 63.
- BELOZEROV, V., LEGEIDA, S., MAKHATILOVA, A. (2006). An edge effect in work piece hardening by Seller burnishing. *Vestn Mashinostr* 24 (4) pp 46 – 48.
- BRIDGMAN, P. (1944). The stress distribution at the neck of a tensile specimen. *Transactions of the American Society of Metals* 13 (4) 553 – 574.
- COROMANT COROKEY. (1996). Guía de aplicación de herramientas. pp 38 – 43.
- FERNÁNDEZ, T., FERNÁNDEZ, E., RODRÍGUEZ, I., ALCÁNTARA, D. (2010). Variación microestructural del acero AISI 1045 endurecido por rodadura. *Revista Minería y Geología* 26 (3) pp 22 - 32.
- FERNÁNDEZ, T., FERNÁNDEZ, E., RODRÍGUEZ, I., ALCÁNTARA, D. (2012). Tensiones de contacto por el Método de Elementos Finitos del acero AISI 1045 endurecido por rodillo. *Revista de Metalurgia* 48 (1) pp1 – 8.
- GABB, T., TELESMA, J., KANTZOS, P., PREVEY, P. (2002). Improved method being developed for surface enhancement of metallic materials *Advanced Materials and Processes* 160 (1) 69 – 72
- GOICOLEA, J., GABALDÓN, F., GARCÍA-GARINO, C. (1996). Interpretación de la estricción en el ensayo de tracción empleando modelos hipoeásticos e hiperelásticos. *Memorias del III Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*. SEMNI, Zaragoza.
- GONZÁLEZ-CASTELLANOS, R. (2000). Principios básicos de escalado. (1ra Edición), La Habana, Ed. Universitaria. 11- 19.
- MAZEIN, P., PRUSAKOV, D., TCHUNIN, A. (2001). Modeling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations. *Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center*. Issue # 1, (10). 485 – 489.
- MORENO, P. (2009). Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas. California Institute of Technology. Universidad de Sevilla. <http://scala.uc3m.es/MANS>. Consultado lunes 28 de febrero de 2009.
- PERO-SANZ, J. (2000). Ciencia de los materiales. Metalurgia Física. Estructura y Propiedades, (3ra Edición), España, Editorial DUSSAT SA. 393 – 502.
- ROSE, S. (2000). Rolling a superior finish T & P Shop Talk Tooling & Production Magazine, Issue March USA, <http://www.cnc-training.com/>, Consultado el 25 de Marzo del 2008.
- SIGNORELLI, J., FOURTY, A., BERTINETTI, M. (2006). Influence of work-hardening laws on the predictions of forming limit diagrams of polycrystalline steels using a rate-dependent plasticity model. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT*, Foz do Iguaçu.