

Movimiento por cicloide en la deformación en frío del acero AISI 1045 empleando rodillo

Cycloid movement in the cold deformation of steel AISI 1045 using roller

Tomás Fernández Columbié¹, Isnel Rodríguez González¹, Dayanis Alcántara Borges¹, Nelson Gainza Galbán²

¹Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba
tfernandez@ismm.edu.cu

²Empresa Moanickel S.A, Moa, Holguín, Cuba ngainza@moanickel.com.cu

Resumen

Se determinó el estado tensional del acero partiendo de un diseño de experimento donde se consideraron como variables fundamentales la profundidad de penetración, el diámetro del rodillo, el ángulo de contacto y las tensiones de contacto con fuerzas de deformación de 500 N, 1 500 N y 2 500 N. Se establece que, en la medida en que el rodillo se desplaza por la superficie del material, surgen tensiones de compresión que deforman la red cristalina, introduciendo tensiones internas que provocan el endurecimiento por acritud.

Palabras clave: cicloide; deformación plástica; rodillo simple; acritud; tensiones.

Abstract: The stress state of the steel was determined from an experimental design where penetration depth, roller diameter, contact

angle and the stresses of contact with deformation forces of 500, 1 500 and 2 500 N were considered as main variables. It is settle down that, as the roller moves through the surface of the material, compression stresses arise which deform the crystal lattice, introducing internal stresses that cause hardening by acrimony.

Keywords: cycloid; plastic deformation; acrylic single roller; stress.

1. INTRODUCCIÓN

Una cicloide es una curva generada por un punto perteneciente a una circunferencia generatriz al rodar sobre una línea recta directriz, sin deslizarse; es una curva que describe un punto perteneciente a una rueda que gira, lugar geométrico generado por el punto de una llanta o circunferencia que rueda sobre una línea recta (Villanueva 1985).

Según Fernández y otros investigadores (2008), el proceso de deformación plástica superficial en frío por rodillo del acero AISI 1045 se realiza en la relación de contacto que se establece entre el rodillo y la pieza, entre ambos detallan una curva llamada cicloide descrita por el rodillo y que, según Martynenko (2002), la cinemática entre ambos elementos está caracterizada por ángulos que permiten describir el movimiento entre ellos; ángulos que se corresponden con el elemento de mayor dureza.

Mediante el método de los elementos finitos (Fernández *et al.* 2012a) también se puede abordar el estudio del comportamiento de la deformación plástica superficial con rodillo del acero AISI 1045, a través del mismo se realiza la descripción numérica del fenómeno. En este estudio el autor expone que, luego del deslizamiento del rodillo sobre la pieza, bajo una presión controlada, el flujo de material, debajo de la capa deformada, excede el punto de fluencia de la superficie de la pieza no endurecida, donde se crea una capa de metal consolidada, que provoca el aumento de las propiedades funcionales en la superficie.

El comportamiento plástico del acero AISI 1045 durante la deformación plástica superficial está definido por una deformación que se caracteriza por ser irreversible, independiente del tiempo y dependiente de la historia de la carga. De esta forma, si se aumenta de manera progresiva el estado de cargas, después de un comportamiento elástico inicial en el que las tensiones y las deformaciones son proporcionales, aparece un comportamiento plástico del material en el que se rompe esa proporción; el acero queda endurecido y existe una deformación en la estructura cristalina, quedando tensionada con la disminución del tamaño de los granos, el tamaño de la cristalita y la distancia interplanar por el efecto de

la acritud (Fernández, Rodríguez y Alcántara 2009, 2010 y Fernández *et al.* 2012b).

Moreno y otros investigadores (2014) consideran que los principales factores de fortalecimiento del proceso de deformación plástica superficial son la profundidad e intensidad de la deformación de la capa superficial y el sistema de tensiones resultantes, elementos que fueron estudiados a través de la obtención del Ruido Magnético Barkhausen (RMB). Teniendo en cuenta que estos indicadores de la calidad en la capa superficial, al emplear rodillos para realizar la deformación plástica superficial, tienen la mayor influencia en: la fuerza de deformación, la magnitud máxima de las tensiones normales y tangenciales que actúan en el punto de deformación y también en la relación de sus valores, que determinan la dirección de las deformaciones y desplazamientos del metal en la zona de contacto.

Fernández y demás colaboradores (2011) estudian el proceso de la deformación plástica en frío y plantean que es un método de endurecimiento de materiales que logra alta dureza. El aumento del grado de deformación está muy vinculado con la aparición del fenómeno de las dislocaciones y a medida que el grado de deformación es mayor son necesarias más tensiones para continuar deformando, por tanto, el aumento del grado de deformación en frío aumenta la resistencia del acero para ser deformado.

Kukielka (1989) plantea que la tensión de fluencia aumenta conforme la densidad de dislocaciones lo hace y la velocidad a la que tiene lugar el endurecimiento por deformación depende de la velocidad a la que la densidad de dislocaciones aumenta con la deformación. Esto significa que la velocidad de endurecimiento por deformación es dependiente de la forma en la que las dislocaciones se distribuyen e interactúan entre sí. Por otro lado, Alcántara, Fernández y Rodríguez (2008) plantean 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.

El trabajo tiene como objetivo establecer el efecto del movimiento, por cicloide, durante el proceso de deformación en frío del acero AISI 1045, empleando rodillo simple.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de experimento

Para establecer el comportamiento de la deformación plástica por rodillo del acero AISI 1045, a partir del método de la cicloide, se seleccionaron tres niveles (mínimo, medio y máximo), lo cual está determinado por el mayor o menor grado de endurecimiento que se quiere lograr en el material o por la mayor o menor homogeneidad en la estructura. Los parámetros de deformación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de entrada del experimento

Parámetros	Símbolo	Niveles		
		Mínimo	Medio	Máximo
Profundidad de penetración (mm)	hp	0,02	0,05	0,07
Diámetro del rodillo (mm)	dp		50	
Ángulo de contacto (grado)	θ_k			
Tensiones (MPa)	σ_{YZ}	σ_{YZ-1}	$\sigma_{YZ\Delta}$	σ_{YZ1}
Probetas de acero 1045		L=100 mm y \varnothing 30 mm		

2.2. Metodología empleada para la deformación plástica superficial por rodillo

La magnitud del endurecimiento por deformación en frío y el nivel de las tensiones remanentes en la capa superficial dependen de la fuerza (P), del número de revoluciones (n_r), del avance de la herramienta (S), de la geometría de la herramienta, de la pieza y de las propiedades iniciales de la aleación en tratamiento (HB).

La ubicación de los radios de la pieza y el rodillo a considerar en el proceso de deformación en frío, empleando rodillo, se muestran en la Figura 1.

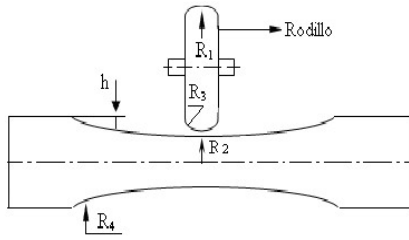


Figura 1. Radios de curvatura del rodillo y de la pieza.

Durante el proceso de deformación plástica por rodillo, el deslizamiento del mismo provocado por la fuerza, es conveniente situarlo hacia el eje de la pieza en tratamiento, en dependencia del esfuerzo y de la resistencia del material. La profundidad del endurecimiento, según Korotcishe (1989), se determina como:

$$h = \sqrt{\frac{P_p}{2 \cdot \sigma_T}} \quad (1)$$

Donde:

h es la profundidad de la capa endurecida; mm,

σ_T es la tensión de fluencia del material a la tracción; MPa.

El área real de tensiones máxima para la superficie de cuerpos curvos, cuando se encuentran en contacto, se determina a partir de la fórmula de Hertz, siempre que el estado tensional sea volumétrico. Para determinar la magnitud del área de la deformación con rodillos, según Boada, Díaz y Campos (2003) es:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 0,245 \cdot n_p \cdot \sqrt[3]{F_n \cdot E^2 \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ son las tensiones máximas en el área de contacto; MPa,

F_n es la fuerza sobre la zona de contacto; N,

$R_{1,2,3,4}$ son los radios de curvatura del rodillo (R_1 y R_3) y la pieza (R_2 y R_4); mm,

n_p es el coeficiente que depende de los radios de la pieza y el rodillo:

$$n_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot R_2 + R_1} \quad (3)$$

Para una relación tensión-deformación durante el proceso de deformación plástica, en el material sometido a este proceso, se logra el apilamiento

de sus granos por el aplastamiento de los mismos, lo que permite incrementar su dureza. Las tensiones de aplastamiento se consideran uniformemente distribuidas sobre toda el área y, según Murthy y Kotiveerachari (1981), se determina como:

$$\sigma_{\text{máx aplast}} = \alpha \cdot \sqrt[3]{P \cdot E^2 \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2} \right)^2} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma_{\text{máx aplast}}$ es la tensión máxima de aplastamiento; MPa

α es un coeficiente que depende de la relación $\frac{A_1}{B}$,

A_1 es el radio de la superficie de endurecimiento de la pieza; mm,

B considera el radio de la sección de trabajo del rodillo y de la pieza; mm,

d_1 es el diámetro del rodillo; mm

d_2 el diámetro de la superficie endurecida; mm.

2.3. Estado de tensión en la zona de contacto con la superficie deformada

El cuerpo rígido no lineal puede ser descrito con la ley de Hooke, donde el módulo de rigidez no es constante y depende de la deformación. Para determinar el estado de tensión durante la deformación plástica superficial en frío con rodillo, según Martynenko (2002), se puede aproximar a la dependencia como:

$$\sigma_i = A \cdot \varepsilon^m \quad (5)$$

Siendo:

σ_i la tensión inicial para la deformación por cicloide; MPa,

A y m son parámetros que dependen de las características mecánicas del material.

A es el parámetro de la tensión para una deformación unitaria y se determina como:

$$A = \sigma_T \cdot m^{-n} \quad (6)$$

Y m se calcula por la ecuación siguiente:

$$m = \varepsilon \cdot \left| \ln \frac{\sigma_T}{\sigma_B} \right| \quad (7)$$

Donde: \bar{n} es el exponente de endurecimiento,
 ε es la deformación real; %,
 σ_B es la tensión elástica del material; MPa.

Para el cálculo de las tensiones hace falta determinar las deformaciones de la superficie en la zona de contacto o la cinemática de los puntos de la zona de deformación. Como trayectoria de los movimientos de los puntos de la superficie a elaborar se toma la familia de la cicloide, como se muestra en el modelo de la Figura 2.

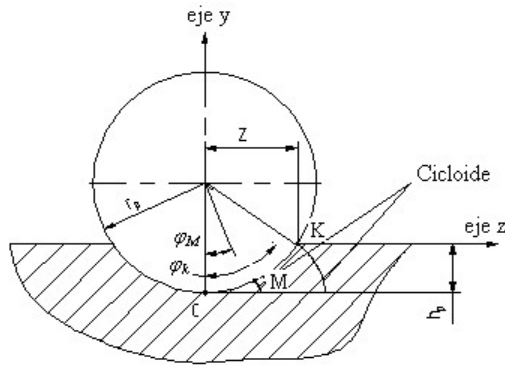


Figura 2. Modelo para determinar los puntos de la cicloide. Fuente Martynenko (2002).

Para establecer el proceso de deformación del acero AISI 1045, empleando rodillo, se tiene en cuenta la trayectoria de la cicloide a partir del ángulo de contacto entre el rodillo y la pieza. Se supone que el punto inferior C del rodillo de deformar, en su corte dado perpendicularmente al eje, se desplaza sin deslizamiento y se calcula, según Martynenko (2002), como:

$$\varphi_k = \cos^{-1} \left(1 - \frac{h_p}{r_p} \right) \quad (8)$$

Donde:

φ_k es el ángulo de contacto a la mitad del ancho de contacto; en grados,
 h_p es la profundidad de penetración del rodillo; mm,
 r_p es el radio del rodillo; mm.

Teniendo en cuenta la interrelación entre las tensiones que actúan, se puede determinar la distribución de las tensiones por la superficie de contacto en la superficie frontal del rodillo, según Martynenko (2002), de la forma siguiente:

$$\sigma_z = A \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{z - z_k}{r_p} \right)^2} \right]^m \quad (9)$$

$$\sigma_y = A \left[\frac{Z_k - Z}{r_p \sqrt{1 - \left(\frac{Z - Z_k}{r_p} \right)^2}} \right]^m \quad (10)$$

La determinación de la mitad del ancho de contacto del rodillo con la pieza, durante el proceso de deformación en frío por el método de la cicloide, se analiza a partir de la relación trigonométrica con el ángulo de contacto (θ_k) por la ecuación (11).

$$Z = r_p \cdot \cos \varphi_k \quad (11)$$

Siendo Z es la mitad del ancho de contacto del rodillo; mm.

Como el proceso de deformación se realiza con rodillo perfilado y la elaboración es en superficie cilíndrica, la variación de la profundidad en la pieza (Z_k) se determina, según Martynenko (2002), como:

$$z_k = \sqrt{R_{PE}^2 - \left[\frac{(R_{PE} + r_p) \cdot (R_{PE} - h_p)}{R_{PE} - (r_p - h_p)} \right]^2} \quad (12)$$

Donde Z_k es la variación de la profundidad en la pieza en mm y R_{PE} es el radio de la pieza elaborada en mm.

El movimiento por cicloide, según Martynenko (2002), se determina como:

$$S_z = r_p [(\varphi_k - \varphi_M) - \text{sen}(\varphi_k - \varphi_M)] \quad (13)$$

$$S_y = r_p [1 - \text{cos}(\varphi_k - \varphi_M)] \quad (14)$$

Para la que:

S_z y S_y - movimiento por cicloide en los ejes z ; y ; mm,

φ_M - parámetro que corresponde al ángulo de contacto $0 \leq \varphi_M \leq \varphi_k$

Teniendo en cuenta la derivada, se determinan las deformaciones relativas en los ejes ε_z y ε_y , según Martynenko (2002), de la siguiente manera:

$$\varepsilon_z = \frac{dS_z}{dz} = \left[\frac{1}{\sqrt{r_p^2 - \frac{(z - z_k)^2}{r_p}}} - 1 \right] \quad (15)$$

$$\varepsilon_y = \frac{dS_y}{dy} = \left[\frac{z_x - z}{r_p \sqrt{1 - \frac{(z - z_x)^2}{r_p}}} \right] \quad (16)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Profundidad de la capa endurecida

La profundidad de la capa endurecida, donde se consideran las fuerzas empleadas en el proceso de endurecimiento y una tensión de fluencia del material de 415 MPa, se determinó por la ecuación 1, los resultados obtenidos son los siguientes: con una fuerza de 500 N, $h_p=0,7$ mm; para fuerza de 1 500 N, $h_p=1,3$ mm y para 2 500 N, $h_p=1,7$ mm.

El aumento de la fuerza de rozamiento incrementa la deformación plástica, a la misma vez que la penetración del rodillo, de 0,7 mm hasta 1,7 mm, conducirá a la fatiga residual interna del material y a un cambio considerable en los parámetros de la dureza en la superficie. Bajo fuerza de rozamiento constante, el rodillo penetra y alisa la superficie, lo que causa una mayor deformación plástica debido a la pequeña área de contacto entre el rodillo y la pieza.

3.2. Tensiones máximas de contacto

La determinación de la variación de la tensión máxima a diferentes fuerzas de rodillado, consideró el módulo de elasticidad de primer género y el coeficiente que depende de los radios de la pieza y del rodillo que, a su vez, fue calculado por la ecuación 3 ($n_p=0,06$). En correspondencia con la ecuación 2 se obtiene un incremento de la tensión, en la medida que lo hace la fuerza y toma magnitud de: 470,4 MPa, para fuerza de 500 N; 525,9 MPa, con una fuerza de 1 500 N y, por último, para una fuerza de 2 500 N, el máximo nivel es de 661,2 MPa.

Las tensiones máximas caracterizan el comportamiento de los esfuerzos; se observa que en la medida que la dureza y la profundidad de penetración se incrementan, también lo hacen dichas tensiones máximas. Otro comportamiento determinado es que las mismas crecen en la

medida que aumenta la fuerza de compresión y disminuye el radio de curvatura del rodillo.

3.3. Tensiones máximas por contacto y por aplastamiento

El cálculo de las tensiones máximas necesarias para lograr el aplastamiento de los granos se determinó por la ecuación 4, la que considera las fuerzas aplicadas, el módulo de elasticidad de primer género, el diámetro del rodillo y los radios de las superficies endurecidas ($R_2=28,60$ mm, para un fuerza de 500 N; $R_2=27,60$ mm, con una fuerza de 1 500 N y $R_2=26,60$ mm, para fuerza de 2 500 N). Al sustituir los valores en la ecuación se obtuvo que las tensiones máximas, para lograr el apilamiento de los granos, según las fuerzas aplicadas, son:

$\sigma_{m\acute{a}x\ aplast}=147$ MPa (con fuerza de 500 N); $\sigma_{m\acute{a}x\ aplast}=213$ MPa (para 1 500 N) y para 2 500 N, $\sigma_{m\acute{a}x\ aplast}=253$ MPa.

Las tensiones máximas calculadas anteriormente incrementan la dureza por acritud al reducir el tamaño promedio de los granos y permiten la compactación de los mismos. Cuando la presión ejercida excede el límite de fluencia de la aleación, la superficie es plásticamente deformada en frío y el material fluye debajo de la capa deformada, entonces como resultado se obtiene una superficie muy pulida y densamente compactada.

El apilamiento o aplastamiento de los granos es resultado de una integración causada por el deslizamiento intracristalino, por la migración de dislocaciones, acompañada de endurecimiento por deformación, lo que consolida progresivamente el cristal. Por otra parte, el estado de tensiones en el grano activa otros sistemas de deslizamiento, los que interactúan con él o los sistemas ya existentes; este mecanismo dificulta aún más la movilidad de los átomos y origina el fenómeno conocido como endurecimiento latente.

3.4. Estado de tensión en la zona de contacto con la superficie deformada

El comportamiento de la tensión inicial se determinó con el empleo del método de la cicloide, para lo que se empleó la ecuación 5; se consideraron los parámetros que dependen de las características mecánicas del material (A y m), donde los resultados fueron obtenidos por las ecuaciones 6 y 7; $A=524,03$ MPa (para fuerzas de 500 N, 1 500 N y 2 500 N) y $m=0,072$ mm para fuerza de 500 N; $m=0,056$ mm para fuerza de 1 500 N y $m=0,029$ mm, para fuerza de 2 500 N. Se tuvo en cuenta la tensión límite de fluencia y una tensión elástica de 200 MPa. En

la Figura 3 se muestra el comportamiento de la tensión por cicloide (σ_i) en la deformación del acero AISI 1045.

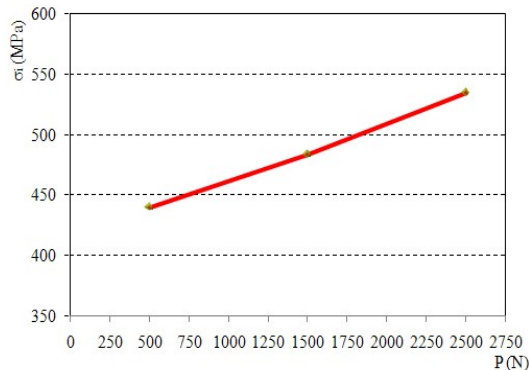


Figura 3. Comportamiento de la σ_i por cicloide en la deformación del acero AISI 1045.

Según la figura obtenida del comportamiento de la tensión inicial (σ_i) por cicloide, en la deformación del acero AISI 1045, se puede observar que la misma tiene un comportamiento ascendente, en la medida que se aumentan las fuerzas de deformación. La curva ajustada de la $\sigma_i=0,047x + 414,5$ con un coeficiente de correlación $R^2=0,967$. La tendencia obtenida demuestra que, según cambia la variable fuerza, se obtienen mayores tensiones.

Se obtuvo que con una fuerza de 500 N, la $\sigma_i=439,57$ MPa; con una fuerza de 1 500 N, la $\sigma_i=483,01$ MPa y con una fuerza de 2 500 N, la $\sigma_i=534,34$ MPa. Existen distintas magnitudes de tensiones que provocan el incremento de las tensiones normales y tangenciales debajo de la capa deformada de la aleación, las que están relacionadas fundamentalmente con estados tensionales del tipo plano. Los cambios de las tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas impuestas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas (esfuerzos de tracción y compresión), los átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones.

3.5. Determinación del ángulo de contacto en el proceso de deformación con rodillo

El ángulo de contacto se determinó por la ecuación 8, teniendo en cuenta la profundidad de penetración calculada por la ecuación 1. Se obtuvo como resultado que:

$$\varphi_k=13,59^\circ, \text{ para } h_p \text{ de } 0,7 \text{ mm,}$$

$\varphi_k = 17,82^\circ$, para h_p de 1,3 mm,

$\varphi_k = 21,25^\circ$, para h_p de 1,7 mm.

De aquí se deriva que, con el incremento de la profundidad de penetración del rodillo, también aumentan los valores del ángulo de contacto.

3.6. Análisis de las tensiones normales

Las tensiones normales para los ejes "z" e "y" se determinaron a partir de las ecuaciones 9 y 10. Para resolver ambas ecuaciones se requiere de los resultados de las ecuaciones 11 y 12, que analizan el ancho a la mitad de contacto del rodillo (Z), cuyos valores dependen del ángulo de contacto (φ_k), de la ecuación 8 y de h (ecuación 1); para $h=0,7$ mm, $Z=8,6$ mm; para $h=1,3$ mm, $Z=47,60$ mm y para $h=1,7$ mm, $Z=46,60$ mm. Las tensiones normales dependen, además, de la variación de la profundidad en la pieza (Z_k), con $h=0,7$ mm, $Z_k=24,98^\circ$; con $h=1,3$ mm, $Z_k=24,95^\circ$ y con $h=1,7$ mm, $Z_k=24,93^\circ$. Los resultados de las tensiones normales en los ejes "z" e "y", en dependencia del ángulo de contacto φ_k y Z_M , son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Tensiones normales por cicloide en los ejes "z" e "y"

φ_k	Z_M (mm)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)
	25,000	489,244	348,752
13,59°	24,996	489,244	345,380
	24,985	489,244	326,501
	25,000	560,700	430,858
	24,996	560,700	430,679
17,82°	24,985	560,700	430,138
	24,966	560,700	429,213
	25,000	645,73	479,60
21,25°	25,000	645,73	479,45
	24,99	645,73	478,99
	24,97	645,73	478,23
	24,94	645,73	477,13

La distribución de las tensiones de contacto en la superficie frontal del rodillo aumenta conforme al comportamiento de la densidad de las dislocaciones; al variar las características de la mitad del ancho de contacto (Z_M), con respecto a las tensiones normales en el eje "z" durante el proceso de endurecimiento, dichas tensiones se mantienen constantes para cada ángulo empleado.

De las tensiones analizadas en los ejes z; y, por el método de la cicloide, en el acero AISI 1045, la mayor incidencia la tiene el eje "y", ya que existen variaciones en los parámetros obtenidos que provocan la movilidad de las dislocaciones y la deformación en el material.

3.7. Análisis del movimiento por el método de la cicloide en los ejes z; y

Para determinar los resultados de las ecuaciones 13 y 14 se tuvo en cuenta el ángulo de contacto calculado por la ecuación 8, el radio del rodillo (r_p) y el parámetro que corresponde al ángulo de contacto ($0 \leq \varphi_M \leq \varphi_k$). Los resultados para el eje "z" se muestran en la Figura 4.

Para el eje "z" se observa, que al variar los parámetros relacionados con el ángulo de contacto, existe un incremento de los cuellos o espirales que forma el rodillo sobre la superficie de la pieza, en correspondencia con la profundidad de penetración, así como un mayor incremento de los puntos de contacto, según se aplica más fuerza. En correspondencia con estas condiciones, los puntos se amplían desde tres hasta cinco, en dependencia de la fuerza y la profundidad; también se puede notar que existe un gran número de puntos que aumentan sus dimensiones al modificar la carga.

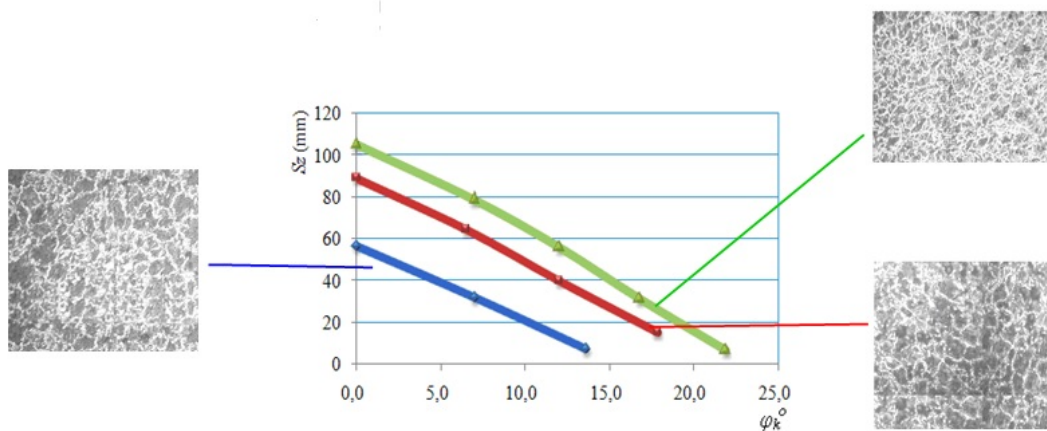


Figura 4. Comportamiento del movimiento por cicloide en el eje "z".

La resistencia a dejarse penetrar que experimenta el material va creando tensiones debajo de la capa deformada y la interrelación entre el rodillo con la superficie de la pieza permite obtener, tanto la ley de distribución en la zona de contacto, como los componentes de la fuerza que hacen falta para alcanzar la calidad de la superficie elaborada. Las curvas ajustadas para cada comportamiento son:

$h_p(0,7)$; $S_z = -22,56x + 53,3$ y un coeficiente de correlación $R^2=0,957$ (azul)

$h_p(1,3)$; $S_z = -24,56x + 83,02$ y un coeficiente de correlación $R^2=0,958$ (rojo)

$h_p(1,7)$; $S_z = -24,36x + 104,5$ y un coeficiente de correlación $R^2=0,969$ (verde)

En la Figura 5, que relaciona el comportamiento en el eje "y", se muestra que al variar el parámetro que corresponde al ángulo de contacto (φ_k), para $13,59^\circ$; $17,82^\circ$ y $21,25^\circ$ (tensiones de signos positivos), las curvas muestran un comportamiento de tendencia cíclica, siendo más prolongada para el ángulo de contacto de $21,25^\circ$. En la medida que se incrementa el ángulo, la formación de surcos o cuellos en forma de espiral es mayor y la variación de los ángulos con respecto al movimiento del rodillo no es constante, los desplazamientos que se obtienen, en correspondencia con la profundidad, tienden a provocar cambios en la estructura del material y en el endurecimiento del mismo.

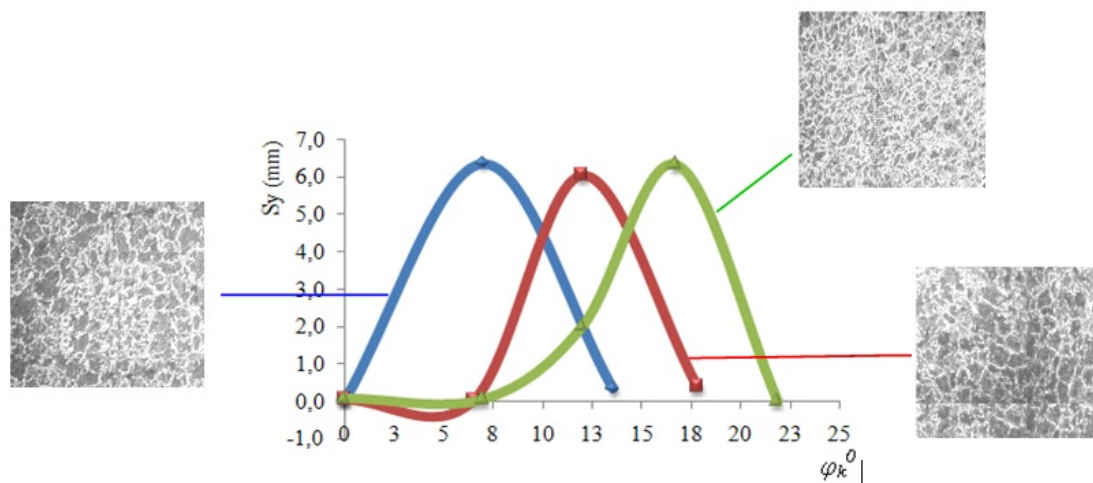


Figura 5. Comportamiento del movimiento por cicloide en el eje "y".

3.8. Análisis de las deformaciones por cicloide

Las ecuaciones 15 y 16 permitieron determinar las deformaciones en los ejes z ; y . Para evaluar ambas ecuaciones fue necesario sustituir los resultados obtenidos en la ecuación 8. El comportamiento se muestra en la Figura 6.

Al variar las características del semiancho de contacto, para el ángulo (φ_k), con un valor de $13,59^\circ$, existe mayor penetración del rodillo; la aleación ofrece menos resistencia para ser deformado por presentar una dureza inicial de 170 HB, además, una estructura más tenaz, debido al tratamiento de recocido al que fue sometida. Sin embargo, para los ángulos de $17,82^\circ$ y $21,25^\circ$ se incrementan las deformaciones, así como el área de contacto, lo que provoca que el material adquiera mayor dureza.

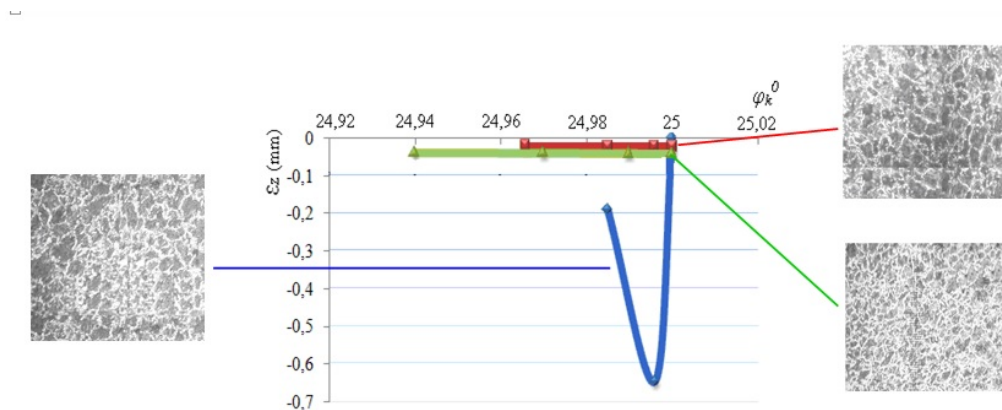


Figura 6. Comportamiento de las deformaciones por cicloide en el eje "z".

Los elementos deformacionales (ángulo de contacto y el cambio de la mitad del ancho de contacto) tienen influencia en el comportamiento de la deformación de la aleación, influyen en el aumento de la velocidad a la cual las dislocaciones se desarrollan, se reduce la movilidad de las mismas, de modo que funcionan como una barrera, de mayor efectividad, para la deformación.

Las tensiones de signo negativo (compresión) activan un sistema de deslizamiento en el eje que provoca el endurecimiento, condensan la estructura, deforman los planos cristalinos y se presentan a nivel macro y microscópico.

Para las deformaciones en el eje "y" (Figura 7) se puede observar que existe una menor profundidad al iniciar el proceso de deformación para un ángulo de contacto de $13,59^\circ$ (tensiones negativas), incrementándose gradualmente en la misma medida que aumentan las fuerzas y el ángulo

de contacto, pero a la vez se genera mayor cantidad de puntos de contacto en la sub-superficie del material. Estas deformaciones (compresión), al igual que en el eje "z", provocan la ruptura interna de la estructura cristalina, afinan el grano y ofrecen mayor dureza a la aleación.

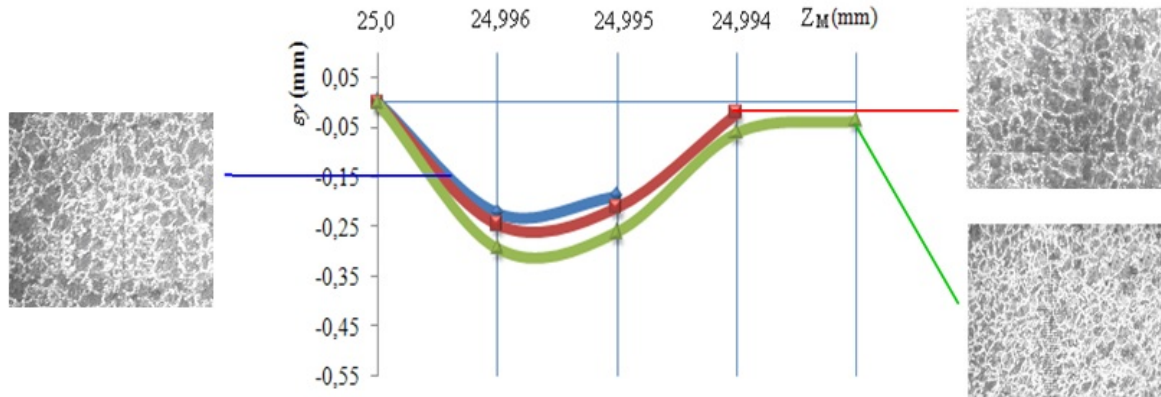


Figura 7. Comportamiento de las deformaciones por cicloide en el eje "y".

Tanto en el eje "z" como en "y" las deformaciones provocan desplazamientos de dislocaciones, dando lugar a mayores escalonamientos. Las tensiones residuales se producen cuando hay fuerzas de enlace no compensadas que originan la separación o el acercamiento entre los átomos de un material. La dislocación de borde positiva causa tensiones de tracción en su parte inferior y de compresión en la parte superior, mientras que una dislocación de borde negativa genera compresión en la parte superior y tracción en la inferior.

4. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos demuestran que existe una proporcionalidad directa entre la profundidad de penetración (h_p) y el ángulo de contacto (ϕ_k) durante el endurecimiento del acero AISI 1045, deformado en frío por el método de la cicloide.
2. La superficie deformada por cicloides en el eje "y" describe un comportamiento de tendencia cíclica, en la medida en que se desplaza por la superficie del material; sin embargo, para un ángulo de contacto de $4,29^\circ$ presenta ambas tendencias, lo cual demuestra que la variación de los ángulos, con respecto al movimiento del rodillo, no es constante y tiende a provocar cambios en la superficie de la pieza.

3. Las deformaciones en el eje "z" durante el proceso de endurecimiento se mantienen constantes para cada ángulo de contacto, sin embargo, al ser de compresión atraviesan el enrejado cristalino deformando al acero AISI 1045.

5. REFERENCIAS

- BOADA, O.; DÍAZ, S. Y CAMPOS, Y. 2003: Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial. *Revista Ingeniería Mecánica* 6(2): 53-58.
- ALCÁNTARA, D.; FERNÁNDEZ, T. Y RODRÍGUEZ, I. 2008: Comportamiento de las capas superficiales deformadas plásticamente por el desgaste en elementos circulares. *Ciencias Holguín XIV*(4): 1-4.
- FERNÁNDEZ, T.; FERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ, I. Y ALCÁNTARA, D. 2008: Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple. *Ingeniería e Investigación* 28(1): 15-21.
- FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I. Y ALCÁNTARA, D. 2009: Tensión-Deformación durante la deformación plástica superficial con rodillo. *Revista de Ingeniería Mecánica* 12(3): 13-22.
- FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I. Y ALCÁNTARA, D. 2010: Variación microestructural del acero AISI 1045 endurecido por rodadura. *Minería y Geología* 26(3): 65-74.
- FERNÁNDEZ, T.; FERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ, I. Y ALCÁNTARA, D. 2011: Evaluación del coeficiente de endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodillo. *Revista Nexa* 24(2): 16-26.
- FERNÁNDEZ, T.; FERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ, I. Y ALCÁNTARA, D. 2012a: Tensiones de contacto por el Método de Elementos Finitos del acero AISI 1045 endurecido por rodillo. *Revista de Metalurgia* 48(1): 1-10.
- FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I.; QUINTANA, R. Y GARCÍA, A. 2012b: Determinación de tensiones por rayos x del acero AISI 1045 deformado por rodillo. *Revista de Ingeniería Mecánica* 15(1): 23-33.
- KOROTCISHE, L. 1989: *Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura*. Mir, Moscú, p. 53-64.
- KUKIELKA, L. 1989: Designating the field areas for the contact of a rotary burnishing element with the rough surface of a part, providing a high-quality product. *Journal of Mechanical Working Technology* 19(3): 319-356.
- MARTYNENKO, O. 2002: The interconnection of strained condition in the area of contact with the kinematics of points of deformed surface points by

the rollers plastic deformation of the surface. Proceeding of Fundamental and application problems of machine building technology International Conference. Tula Technical University, Russia, March 1-September 10.

MORENO, G.; CAPO, J.; FERNÁNDEZ, T. Y AYARDE, D. 2014: La emisión magnética Barkhausen en el acero AISI 1045 deformado plásticamente con rodillo. *Revista Cubana de Física* 31(1): 19-21.

MURTHY, R. Y KOTIVEERACHARI, B. 1981: Burnishing of metallic surfaces a review. Regional Engineering Collage. *Precision Engineering USA* 3(3): 172-179.

VILLANUEVA, J. Z. 1985: Note on the rough cycloidal slide track. *American Journal of Physics* 53(5): 490-491.

Recibido: 24/04/2016

Aceptado: 15/11/2016

Tomás Fernández Columbié, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba tfernandez@ismm.edu.cu