

Microestructuras de uniones disímiles obtenidas mediante el proceso de soldadura por explosivos*

Nolberto Almira Paredes

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se estableció el comportamiento microestructural de uniones disímiles titanio-acero AISI 1020 y de acero AISI 1066-acero AISI 1008 por el proceso de soldadura por explosivos. Las microestructuras obtenidas están compuestas por granos de ferrita exquiaxiales, granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida de ambos materiales base presenta granos finos y alineados del tipo ferrítico. Se analiza el comportamiento de la dureza en las muestras; se observa un incremento de la dureza, desde 120 HV para el acero AISI 1008, hasta 250 HV para el acero AISI 1066.

Palabras clave: acero AISI 1008; acero AISI 1066; titanio-acero AISI 1020; soldadura por explosivo; aleaciones.

* Trabajo tutorado por el Dr. Tomás Fernández Columbié y el Ing. Juan Castillo Matos.
Recibido: 19 enero 2015 / Aceptado: 23 noviembre 2015.

Microstructures of different joints applying the explosion welding procedure

Abstract: The objective was to establish the microstructural behavior of different AISI 1020 titanium-steel and AISI 1066-steel AISI 1008 steel by applying the SMAW (Shielded Metal Arc Welding) welding procedure. The microstructures were composed of very fine equiaxial ferrite troostite type grains and coarse grain with ferrite grid. In the welded area of both base materials there are fine and aligned ferrite grains. The hardness behavior of samples where hardness increases from 120 HV for AISI 1008 steel to 250 HV for the AISI 1066 steel is analyzed.

Key words: AISI 1008 steel; AISI 1066 steel; AISI 1020; titanium-steel.

Introducción

En la actualidad existen diferentes materiales que se emplean en la construcción. Estos difieren no solo en su composición sino también en la forma como han sido manufacturados, creándose la necesidad de evaluar las formas disponibles para su soldadura.

Independientemente del material, el proceso de soldadura empleado y el tratamiento térmico posterior, pueden producirse algunos cambios microestructurales como pequeños precipitados, aumento de tamaño de grano que, en consecuencia, pueden originar cambios en sus propiedades metalúrgicas.

Los aceros soldables se especifican generalmente con orientación hacia las propiedades mecánicas con una considerable amplitud en la composición química, sin embargo, la relación microestructura-propiedades en el proceso de soldadura por explosivos entre materiales disímiles es trascendente debido a que muchas veces los materiales a unir no son iguales, por ende, no tienen las mismas propiedades mecánicas y características metalúrgicas, tanto antes como después de realizada la soldadura.

Los explosivos son sustancias que tienen poca estabilidad química y son capaces de transformarse violentamente en gases. Esta transformación puede realizarse a causa de una combustión, como en el caso de la pólvora, o por causa de un golpe, impacto, fricción, en cuyo caso recibe el nombre de explosivos detonantes, como las dinamitas y los nitratos de amonio. Cada explosivo tiene características específicas definidas por sus propiedades. Conocer estas propiedades es un factor importante para el buen diseño de operación, además, permiten elegir el método más adecuado para cada caso específico.

El empleo industrial en Cuba de procedimientos tecnológicos para el uso de explosivos fue desarrollado por Meriño (1977); trabajos preliminares a este fueron llevados a cabo por Parodi (1991) y Caraballo-Núñez & Vinardell-García (2004).

El objetivo de este trabajo es determinar la relación microestructura-propiedades obtenidas en la soldadura por explosivos en una soldadura disímil entre un acero estructural y un acero al manganeso y de un acero estructural y una aleación de titanio, con base en la metalurgia de las zonas obtenidas.

Material explosivo empleado

Para la realización de este trabajo se utilizó como sustancia explosiva industrial el TECTRÓN 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba, el cual cumple con todos los requerimientos exigidos para la realización de la soldadura por explosivos de las aleaciones objeto de estudio.

Los parámetros de detonación del TECTRÓN 100 se relacionan a continuación: (Ulaex, 2000):

Densidad (ρ): 15 g/cm³ (1 150 kg/m³)

Energía específica (Ee): 740 kcal/kg (3 098 232 Nm/kg)

Velocidad de detonación (Vd): Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora).

Presión de detonación (Pd): Se establece en función del diámetro de la carga (según gráfico proporcionado por la firma suministradora).

Aunque la presión de detonación puede obtenerse utilizando el gráfico correspondiente para el caso de la carga cilíndrica se prefiere realizar el cálculo teniendo como información primaria la velocidad de detonación de la sustancia explosiva y su densidad. Con esto se puede establecer la presión de detonación, cualquiera sea la configuración de la carga explosiva a emplear, con tan solo conocer la densidad de la sustancia explosiva y su velocidad de detonación.

Análisis de los parámetros del proceso de soldadura por explosión

El proceso de unión de materiales diferentes mediante soldadura por explosión comienza por la limpieza de las superficies a unir, aunque el barrido de la onda explosiva ejerce una limpieza de las superficies.

Para determinar la velocidad de colisión y la velocidad de la plancha volante se utilizó

$$\text{la ecuación: } V_p = \sqrt{(2E_k) \left[\frac{\frac{5}{3R^2}}{R^R + 5R + \frac{5}{4}} \right]^{\frac{1}{2}}} \text{ o } V_p = 1,2 \cdot Vd \left[\frac{\left[\frac{1 + \frac{32}{27R}}{1} \right]^{\frac{1}{2}} - 1}{\left[\frac{1 + \frac{32}{27R}}{1} \right]^{\frac{1}{2}} + 1} \right] \quad (1)$$

Donde: Vd - Velocidad de detonación;

R - radio de carga.

Se consideró una velocidad de detonación de 2 800 m/s; un radio de la carga, calculado por la ecuación 2, donde m es la masa de explosivo, con un valor de 0,345 kg.

$$R = \frac{m}{2} \quad (2)$$

Por lo que la velocidad de colisión es 1 196, 16 m/s.

La velocidad de colisión lograda es suficiente para mantener el metal con aspecto de fluido viscoso y lograr la unión metalúrgica entre ellos, ya que este mecanismo consiste en que, bajo la acción de grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad, pueden precipitar fases secundarias, sobre todo del tipo carburo, en la matriz austenítica (Zuidema, Subramanyam & Leslie, 1987; Caraballo-Núñez & Vinardell-García, 2004).

La forma más efectiva de reacción explosiva para el endurecimiento de metales es la detonación. El volumen del explosivo se calculó por la ecuación 3 donde a es el largo de la plancha, en este caso de 20 cm, un ancho de 20 cm y un espesor del explosivo de 1,5 cm; el volumen obtenido fue de 600 cm³. Este volumen es suficiente para unir las aleaciones de titanio-acero AISI 1020 y de acero AISI 1066 - acero AISI 1008.

$$V = a \cdot b \cdot c \quad (3)$$

Las cargas explosivas planas tienen un comportamiento diferente al de las cargas explosivas cilíndricas, en particular en lo que respecta a la velocidad de detonación.

Para un volumen de explosivo de 600 cm³ y una densidad de 1,15 g/cm³ por la ecuación 4 se calculó la masa del explosivo que es de 0,69 kg. El volumen del explosivo calculado permitirá el proceso de soldadura por presión, el cual permite la aparición de la deformación plástica en la intercara que permite, entre otras cosas, la limpieza de la superficie para facilitar el proceso de difusión sólida que tiene lugar.

$$m = V \cdot \rho \quad (4)$$

Donde: V- volumen del explosivo, cm³;

ρ - densidad del explosivo, g/ cm³.

Para la desviación del explosivo, donde se tuvo en cuenta la ecuación 5, se tomó para nuestro trabajo el valor de 0,8; de igual manera se consideró el ángulo de colisión β con un valor de 7, considerando la ecuación 6.

$$\phi = \left[-1 - \frac{V_G}{2E_K} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,7 \text{ a } 0,83 \quad (5)$$

Donde: ϕ - desviación del material explosivo;

V_G - velocidad de detonación de la partícula detrás del frente de detonación de los gases.

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{V_P \cos(\alpha/2)}{V_G - V_P \sin(\alpha/2)} \right] \quad (6)$$

La velocidad de la partícula (U_p) se calculó por la ecuación 7 (Caraballo-Núñez & Vinardell-García, 2004) donde se tuvo en cuenta una velocidad de detonación de 2 800 m/s, la cual fue dividida por cuatro y se obtuvo un valor de 700 m/s.

$$U_p = \frac{v_d}{4} \quad (7)$$

En esta compactación dinámica entre la placa base y la placa volante la onda de choque induce altas presiones que permiten la unión entre partículas y formación de compacto con altas densidades, sin inducir difusión de largo alcance o transformación de fase alguna. El efecto de frotación cortante, que se supone tiene lugar durante la compactación dinámica, produce una fuerte unión entre las partículas.

En la red cristalina los átomos se encuentran en posiciones de mínima energía, el deslizamiento exige que un átomo pase de una posición de equilibrio a la siguiente, no solo para los átomos del Fe, sino también para los del C, Mn, Si, Ni, Ti. En consideración a la existencia de dislocaciones que facilitan el desplazamiento y una deformación permanente, que permiten la difusión de un átomo dentro del otro, habrá un deslizamiento de las cristalitas en la red cristalina, lo que consolida los cristales de todos los granos en el agregado, fenómeno que conduce a la obtención de un grano más fino, lo que concuerda con Pero-Sanz (2000).

Para un contacto lineal, como es el caso de preparación de las muestras para realizar la unión soldada por explosivo, la fluencia debajo de la capa superficial comienza cuando la presión media de contacto es aproximada a la resistencia máxima de la aleación, sin embargo, la zona sub-superficial plástica está rodeada y constreñida por material que aún está respondiendo elásticamente. Se pueden alcanzar magnitudes de

la tensión de contacto con el límite de fluencia del material antes de que la zona crezca lo suficiente como para lograr, en la superficie, el resultado de un flujo plástico masivo, lo que es consistente con Mutlon (1992) y Han, Pyoun & Kim (2002).

Análisis del proceso de maquinado de las probetas

Como el mecanizado es el proceso que consiste en la fabricación de piezas de gran precisión y el método se basa en el arranque de material de un bloque inicial de materia prima, mediante una herramienta, hasta la obtención de la geometría de la pieza final, para la fabricación de las muestras se utilizó la ecuación 7. El diámetro de la fresa empleado fue de 60 mm y el número de revoluciones fue de 250 mm/rev, por lo que la velocidad de corte será de 47,1 m/min.

La velocidad de corte calculada está entre los parámetros establecidos para el maquinado de las aleaciones objeto de estudio. La influencia de la velocidad de corte durante el maquinado, con una determinada herramienta, trabajando el mismo material y sin modificar el avance y la profundidad de pasada, han demostrado que para bajas velocidades de corte el rendimiento es pequeño; si se aumenta la velocidad, aumenta el rendimiento. A partir de una velocidad de corte más elevada el rendimiento de la herramienta disminuye notablemente, por el aumento de temperatura que reblandece el filo.

Por la ecuación 8 se calculó la potencia de corte necesaria para realizar el corte:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot f \cdot n}{1000} \quad (8)$$

Donde: V_c - velocidad de corte; m/min;

D - diámetro de la fresa; mm;

n - número de revolución; rev/min;

1 000 - factor de conversión de metro a milímetro.

Se determinó P_z , potencia necesaria para realizar la operación en la máquina seleccionada, por la ecuación: $P_z = P \cdot F$ siendo $F = a \cdot b$ (9)

Donde:

$a = 0,9 \cdot S_z$;

b - ancho de fresado;

P - presión específica

Para los aceros $P = 40\text{--}55 \text{ kgf/cm}^2$;

F: Área de la sección transversal del corte.

Se tuvo en cuenta el valor de a que fue de 0,18 mm, un ancho de fresado de 3 mm, una presión específica de 40 kgf/cm^2 , luego el valor de P_z que fue de 0,21 kg se empleó para determinar la potencia de corte efectiva con una velocidad de corte de 47,1 m/min, calculado por la ecuación 7; se sustituyeron estos valores en la ecuación 9 y la potencia de corte necesaria para realizar el corte es de 0,0017 kW.

$$NC = \frac{Vcr}{6120} \quad (10)$$

Por la ecuación 11 se determinó la potencia necesaria para poner en movimiento la máquina. Se determinó que para una potencia del motor $N_m = 10 \text{ kW}$ y un rendimiento de la fresadora $\eta = 0,8$, el resultado es de 8 kW.

$$Nh = N_{mot} \cdot \eta \quad (11)$$

El tiempo de maquinado consumido para realizar el proceso de corte se determinó por la ecuación 12, para una longitud de fresado de 200 mm, un número de revoluciones de 250 rev/min y un avance de 125 mm/min, el tiempo es de 0,0064 min.

$$Tm = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \quad (12)$$

Los factores fundamentales de los elementos de fresado calculados como: la profundidad y ancho del fresado, el avance, la fuerza de corte, potencia consumida y tiempo de maquinado, permitieron determinar que es posible realizar el corte de las muestras con este proceso de arranque de virutas.

Análisis microestructural de la aleaciones titanio-acero AISI 1020

Para realizar el análisis microestructural de las muestras se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas. Todas las muestras fueron observadas a 200x. Las microestructuras analizadas en la Figura 1 muestran diferentes orientaciones cristalinas del grano, las que contribuyen a la activación de un conjunto de sistemas de deslizamiento y se convierten en un sistema activo que determina los niveles de deformación y tensiones locales del grano y, consecuentemente, con la deformación a nivel macroscópico.



Figura 1. a) Vista transversal, b) Vista longitudinal, c) Vista frontal.

La Figura 1 se corresponde con la unión soldada disímil titanio-acero AISI 1020. La parte superior está compuesta por granos de ferrita exquiaxiales, los cuales se reducen en la medida en que se acercan a la zona de fusión de la aleación de titanio. La interface del cordón presenta una modificación de la microestructura en la línea de fusión con refinamiento de grano, mientras que en la ZAT existe un crecimiento de grano marcado por los límites de grano y en el interior de los granos hay pequeños subgranos; en cuanto al cordón de soldadura, tiene una estructura en forma de ola, sin presentar la microestructura de granos columnares cerca de la línea de fusión, mientras que en el centro del cordón de soldadura la microestructura es equiaxial debido a la solidificación constitucional del cordón después de realizado el proceso de soldadura.

Los efectos más graves en el material base serán en las zonas cercanas al cordón debido a la disipación del calor. Esta zona alcanza temperaturas mayores a la de fusión del propio material y, por lo comentado anteriormente, la estructura del titanio varía proporcionalmente a la zona afectada por el calor.

Las microestructuras presentan una estructura de mayor tamaño en el crecimiento de grano. La fuerza impulsora del proceso del crecimiento de grano resulta de la disminución de la energía libre, como consecuencia de la reducción del área de la frontera de grano. El crecimiento de grano se produce por difusión cuando la temperatura es suficientemente elevada y el tiempo de tratamiento térmico suficientemente largo, lo que fue reportado por Fukui & Inamura (2004).

De esta manera, al disminuir el número de granos por unidad de volumen, el tamaño de los granos aumenta y se produce una reducción del área de la frontera de grano, así como una disminución de la energía almacenada, que lleva a que el material

alcance un estado de elevada estabilidad termodinámica, lo cual coincide con lo planteado por Mangonon (2001).

Análisis microestructural de la aleaciones AISI 1066 – acero AISI 1008

Para realizar el análisis microestructural de esta dos aleaciones se considera que un acero al carbono, de un bajo contenido de carbono de 0,08 %, estará formado por una proporción de 75 % de fase ferrita (cuyo contenido de carbono a temperatura ambiente no pasa de 0,008 %) y aproximadamente 25 % de perlita (cuyo contenido de carbono es fijo y corresponde a 0,8 %); mientras un acero de mayor contenido de carbono (por ejemplo, 0,40 %) tendrá mayor proporción de perlita (aproximadamente 9 %).

La Figura 2 se corresponde con la unión disímil de las aleaciones AISI 1066–acero AISI 1008.

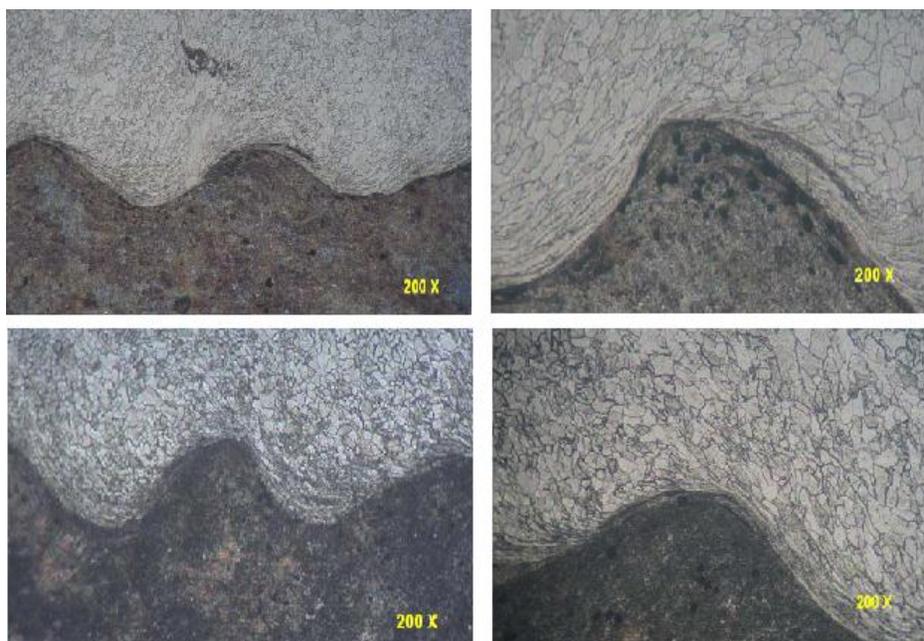


Figura 2. a) Vista transversal, b) Vista longitudinal, c) Vista frontal, d) Vista longitudinal.

En las microestructuras obtenidas se puede observar el comportamiento descrito por la ola obtenida en la zona de fusión del material, donde el material de mayor dureza, el acero AISI 1066, se introduce por efecto de la difusión en el acero AISI 1008, ya que este es más dúctil y tenaz que el primero, permitiendo que por los átomos del mismo se difundan las estructuras de los átomos del material de mayor dureza.

Se aprecia en la zona de soldadura una distribución de los granos de ambas aleaciones en un sentido preferente, lo cual está asociado a la presión de detonación y a la onda expansiva del explosivo al ejercer su fuerza sobre la placa volante.

La distribución de temperaturas máximas se concentra a ambos lados del cordón de soldadura, en dos bandas estrechas, y cuando aumentan la distribución de temperaturas máximas se dispersa, lo que provoca que las bandas se ensanchen.

Al analizar la unión, ya sometidos a las condiciones de soldadura por explosivos, se puede observar que en la unión soldada la estructura del acero AISI 1066 (parte oscura) muestra un fondo de granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida de ambos materiales base (parte clara) presenta granos finos y alineados del tipo ferrítico.

Del análisis metalográfico se concluye que como consecuencia del trabajo de deformación en frío realizado por la acción de las cargas explosivas se origina una textura de deformación plástica con la presencia de líneas características de planos de deslizamientos.

A partir de la observación de las micrografías de probetas tratadas con explosivos y las probetas patrón que no recibieron tratamiento, no es posible afirmar que, bajo la acción de las grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad al detonar la sustancia explosiva, se haya producido la precipitación de fases secundarias, sobre todo del tipo carburo en la matriz austenítica (Caraballo-Núñez & Vinardell-García, 2004).

Análisis de la dureza

Para la evaluación de la dureza se realizaron tres mediciones de dureza, como mínimo, en cada una de las zonas de soldadura de las aleaciones, las que luego fueron promediadas; en la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1. Resultados de análisis de la dureza

Materiales	AISI 1066	AISI 1008	Titanio	AISI 1020
Dureza (HRB)	97,1	63,3	89,8	83,6
	97,9	64,8	87,6	82,6
	98,9	64,1	90,7	84,3
	HV		HV	
Dureza ZAT	350 HV		220 HV	

Se puede observar que las zonas evaluadas presentan variaciones en cada una de las mediciones a lo largo del ensayo, la diferencia en las mismas es significativa para la obtenida para el acero AISI 1020-titanio. Las durezas reportadas en todos los ensayos consecuentes son el promedio de dichas mediciones.

La causa del incremento de la dureza en las muestras soldadas por explosivos se debe a dos factores. El primero es que al disminuir el tamaño aumenta el número de fronteras de grano en una misma área, esto provoca una elevación de las tensiones a nivel cristalino. El otro es que en los metales y aleaciones policristalinas los bordes de los cristales constituyen un obstáculo ante el que se acumulan las dislocaciones, lo cual fue reportado por Callister (1999).

Análisis de la dureza en relación a la velocidad de detonación

Para determinar el comportamiento de la dureza, en relación a la velocidad de detonación, de las aleaciones y su comparación con los mismos aceros, sometidos a deformación plástica plana por proceso de soldadura por explosivos, se graficó la dureza vs velocidad de detonación (Figura 3).

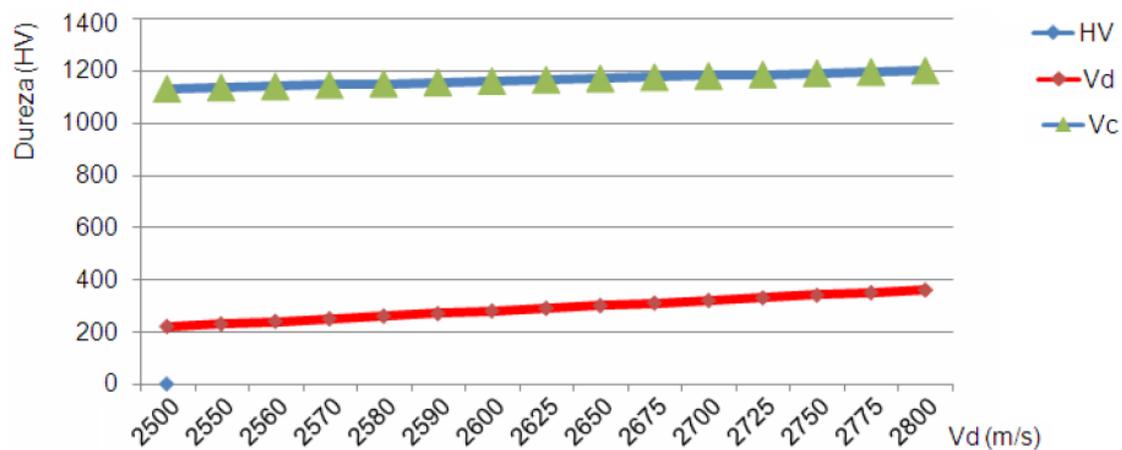


Figura 3. Comportamiento de la dureza vs velocidad de detonación y velocidad de colisión.

Para el incremento de la velocidad de detonación y velocidad de colisión entre las aleaciones se puede observar que, en la medida en que se incrementan estas dos variables, aumenta la dureza; lo que demuestra que las mismas son directamente proporcionales, ya que las líneas obtenidas mantienen una tendencia lineal a incrementarse en la medida en que aumentan estos valores, lo que trae consigo el incremento de la dureza.

Las tensiones máximas calculadas anteriormente incrementan la dureza por acritud al reducir el tamaño promedio de los granos y permiten el compactamiento 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. 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.

El estado de tensiones en el grano, presumiblemente, 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.

Conclusiones

Para realizar la uniones disímiles titanio-acero AISI 1020 y de acero AISI 1066-acero AISI 1008, por el proceso de explosión, se consideró un volumen de explosivo de 600 cm³ y una densidad de 1,15 g/cm³, con lo que se logró una velocidad de 2 800 m/s que permitió el flujo plástico de las aleaciones y lograr la unión metalúrgica.

Las microestructuras obtenidas en forma de ola, luego del proceso de detonación, justifican el comportamiento morfológico obtenido, así como estructuras compuestas por granos de ferrita exquiauxiales, granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida de ambos materiales base presenta granos finos y alineados del tipo ferrítico.

En los perfiles de dureza realizados en las uniones disímiles se determinó un incremento de dureza de 120 HV para el acero AISI 1008 y hasta 250 HV para el acero AISI 1066, motivado por la acritud y el efecto de las dislocaciones.

Referencias bibliográficas

CALLISTER, W. 1999: *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Fifth Edition. John Wiley & Sons, Inc., 8 195 p.

- CARABALLO-NÚÑEZ, M. & VINARDELL-GARCÍA, C. 2004: Evaluación del comportamiento físico del acero Hadfield sometido a cargas explosivas. *Minería y Geología* 20(1-2): 95-101.
- FUKUI, Y. & INAMURA, T. 2004: Mechanical properties of a Ti-Nb-Al Shape Memory Alloys. *Material Transaction* 45(4): 1 077-1 085.
- HAN, C.; PYOUN, Y. & KIM, C. 2002: Ultrasonic micro-burnishing in view of eco-materials processing. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal* 4(1): 25-28.
- MERIÑO, G. 1977: Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. CENIC, La Habana.
- MANGONON, P. 2001: *Ciencia de materiales: Selección y diseño*. Pearson Educación, México, p. 563-580.
- MUTLON, P. 1992: Rolling contact fatigue in railway under high axis loads. *Wear* 144(28): 139-152.
- PERO-SANZ, J. 2000: *Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades*. 3 ed. Editorial DUSSAT S.A., España, p. 393-502.
- ULAEX. 2000: Accesorios para voladuras. Catálogo Industrial.
- ZUIDEMA, B. K.; SUBRAMANYAM, D. K. & LESLIE, W. C. 1987. The effect of aluminum on the work hardening and wear resistance of Hadfield manganese steel. *Metallurgical transactions A* 18(9): 1 629-1 639.