

## **EFFECTO DEL TRATAMIENTO CON EXPLOSIVOS SOBRE LAS TENSIONES RESIDUALES EN UNIONES SOLDADAS DE ACERO AL CARBONO**

J. GARCIA JACOMINO, J. BURGOS SOLA, M. ALVAREZ LUNA, J. GARCIA ARTEAGA

Centro de Investigación de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km. 5½, Santa Clara, Villa Clara, CP. 54830, Cuba.  
e-mails: jacomino@uclv.edu.cu jacomino69@gmail.com

Recibido: enero de 2007

Recibido en forma final revisado: mayo de 2007

### **RESUMEN**

En el trabajo se estudia el efecto de la energía de la detonación de un explosivo como método para reducir las tensiones residuales en la zona afectada por el calor de uniones soldadas. Se realiza un análisis comparativo de dos alternativas de colocación de la carga explosiva: una de forma lineal y la otra de forma sinusoidal. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del método y que en ambos casos se logra una disminución de las tensiones residuales entre el 50 y el 60%, permitiendo afirmar que el mismo ofrece una alternativa a tener en cuenta para extender la vida útil de las uniones soldadas.

*Palabras clave:* tensiones residuales en uniones soldadas, tratamiento por explosivos, alivio de tensiones residuales.

## **EFFECT OF EXPLOSIVE TREATMENT ON RESIDUAL STRESS IN CARBON STEEL WELDING JOINTS**

### **ABSTRACT**

In this paper, the effect of the detonation energy of explosive charges as a method to reduce residual stresses in the heat affected zone of welded joints was studied. A comparative analysis of two alternatives for the positioning of the explosive charge is made: one of linear form and the other sinusoidal. The results obtained before and after the treatment demonstrate the effectiveness of the method and that in both cases a decrease in residual stress is obtained, with values which range between 50 and 60%, allowing us to affirm that both alternatives offer a possible solution to extend the working life of the welded joints.

*Keywords:* residual stress in welding joints, explosive treatments, residual stress relief.

### **INTRODUCCIÓN**

La soldadura implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión-contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido, de esta manera se puede afirmar que durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de las piezas, el aumento de volumen de ésta resulta impedido por el calentamiento desigual del metal base y por el grado de embridamiento que tenga la misma, por lo que el crecimiento del volumen libre será función directa del gradiente de temperatura « $\Delta T$ » y del coeficiente « $\alpha$ » de dilatación del material calentado (Masubuchi, 1980; Mochizuki *et al.* 2005).

La tensión térmica de compresión resultante corresponderá a aquella que produce una reducción de volumen equivalente a la acción de impedimento de la expansión. Cuando la máxima temperatura alcanzada no exceda de cierto valor, dicha tensión se encontrará en el campo elástico y su valor será igual al múltiplo de la deformación específica ( $L/L_0$ ) por el modulo de elasticidad del material (Glizmanenko, 1968; Mochizuki *et al.* 2005).

En el caso de una unión soldada, en la Zona de Influencia Térmica (ZIT), donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en

condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron afectadas durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, tensiones térmicas de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material (Masubuchi, 1980; Mochizuki *et al.* 2005).

Las tensiones residuales pueden llegar a tener valores elevados y no permisibles (Guliaev, 1977; Glizmanenko, 1968; Masubuchi, 1980), por lo que es necesario atenuar o eliminar dichas tensiones, existiendo diferentes métodos, agrupados en dos grandes campos: los tratamientos térmicos y los tratamientos mecánicos; ambos bien conocidos, son utilizados para reducir los esfuerzos residuales, pueden incluir precalentamiento, postcalentamiento, impactos, vibraciones, etc. (Guliaev, 1977; Mead, 2003); pero, en el caso de construcciones o estructuras metálicas de gran porte para un tratamiento «in situ» están limitados.

La energía liberada en la detonación de una sustancia explosiva, como fuente de impacto localizado en la zona afectada por el calor resulta un método alternativo y перспекivo, para aplicarse en el alivio de las tensiones residuales de estructuras metálicas voluminosas y de difícil acceso (Petushkof *et al.* 1976; Schmidt *et al.* 1992; Trufiakov *et al.* 1972; Didyk *et al.* 1994; Petushkof, 2003), por lo que el objetivo de este trabajo es: estudiar el efecto de la detonación de cargas explosivas sobre las tensiones residuales, valorando dos variantes de colocación del cordón detonante en la zona afectada por el calor de la soldadura.

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El material seleccionado para las probetas fue el acero de construcción ASTM A36; las propiedades mecánicas empleadas fueron: límite de fluencia de 250 MPa (36300 psi), límite de rotura de 400-550 MPa (58000 - 79800 psi) y 23% de elongación en 50 mm de longitud calibrada (ASTM, 2001); las dimensiones de las probetas fueron de 400X 80X10 mm.

La fijación segura de la probeta se realizó mediante el dispositivo de fijación mostrado en la figura 1, el cual no permitió la libre dilatación y contracción de la misma durante la aplicación del calor en el proceso de soldadura. El apriete de los tornillos se puede observar en la figura 2, realizándose mediante una llave de apriete controlado a 130 Nm, comenzando por un extremo del dispositivo y terminando por el otro, lo que posibilitó un apriete homogéneo para cada probeta en toda la sección, además de garantizar que las condiciones de rigidez fuesen uniformes en todas las repeticiones del experimento.

Se logró la holgura en la junta a soldar de las probetas mediante una lámina de acero de 1,5 mm de espesor, mantenida en el lugar durante el apriete y retirándola al momento de soldar.

El proceso de soldadura utilizado fue el de Arco Eléctrico Manual con electrodo revestido (SMAW, conforme a la clasificación AWS), utilizando electrodos de 3 mm Ø tipo E 6013 VD según AWS, con una corriente de soldadura de 130 A, en posición plana.

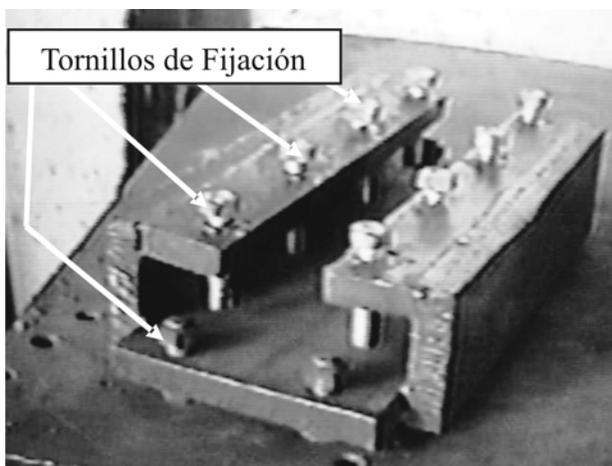


Figura 1. Dispositivo de sujeción.

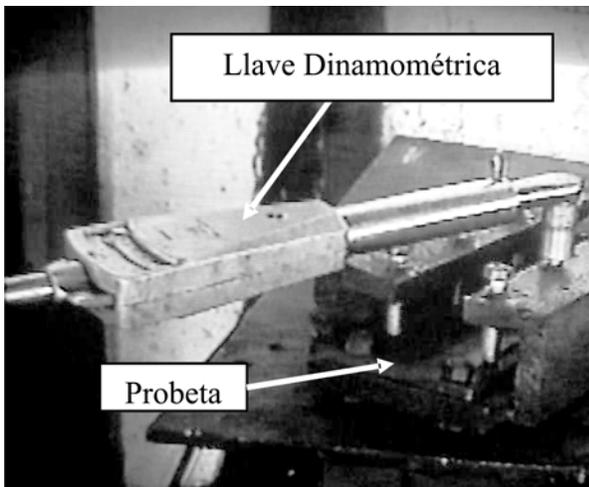


Figura 2. Apriete controlado.

Durante la realización del proceso se registraron los valores de la corriente de soldadura, el voltaje de arco y el tiempo de realización del cordón. Los parámetros de corriente y voltaje de soldadura fueron medidos en tres puntos de la junta soldada y se utilizó la media de los mismos para los cálculos. Con el tiempo medido y la longitud del cordón se determinó la velocidad de soldadura. Una vez terminada la soldadura, la probeta se dejó enfriar hasta la temperatura ambiente, para luego ser retirada del aditamento y limpiada sin la aplicación de golpes fuertes.

**Tabla 1.** Parámetros de Soldadura y Cálculo de la Zona Activa (Bpl).

Probetas	Parámetros de Soldadura			Energía Lineal Específica	Ancho zona plástica	Ancho zona elasto-plástica	Bpl	2Bpl
	I <sub>s</sub> Amp	V Volt	V <sub>s</sub> CM/SEG	Q <sub>o</sub> J/CM <sup>2</sup>	b1 cm	b2 cm	cm	cm
A, B, C, D, E y F	128 131	25-28	0.18 0.25	5633 7511	0.87-1.16	1.57-1.63	2.50 2.73	5.00-5.48

En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros de soldadura y el resultado de los cálculos de la Zona Activa (Bpl), que fueron realizados según y conforme al método propuesto por Trochún (Frolov, 1988), como se muestra a continuación donde:

$$Bpl = b1 + b2 \quad (1)$$

Siendo: b1= ancho de la zona plástica, mm

b2= ancho de la zona elastoplástica, mm

Ancho de la zona plástica b1

$$b1 = \frac{0.484 * q_o}{C\rho * T^*} \quad (2)$$

Siendo: q<sub>o</sub> = energía lineal específica de soldadura, J/cm<sup>2</sup>

Cρ = capacidad calorífica volumétrica, J/cm<sup>3</sup> °C

T\* = temperatura de transición, °C

Energía lineal específica de soldadura q<sub>o</sub>

$$q_o = \frac{Q_{ef}}{V_s * \delta_o} \quad (3)$$

Siendo: Q<sub>ef</sub> = potencia efectiva, J/cm<sup>h</sup>  
V<sub>s</sub> = velocidad de soldadura, cm/h  
δ<sub>o</sub> = espesor de cálculo  
δ<sub>o</sub> = dos veces el espesor de la chapa, cm

Potencia efectiva Q<sub>ef</sub>

$$Q_{ef} = V_a * I_s * \eta \quad (4)$$

Siendo: V<sub>a</sub> = voltaje de arco, V

I<sub>s</sub> = corriente de soldadura, A

η = coeficiente

Ancho de la zona elastoplástica b2

$$b2 = K_2 * (H - b1) \quad (5)$$

Siendo: K<sub>2</sub> = coeficiente

H = semilongitud de la chapa, cm

### Aplicación de la técnica del alivio de tensiones residuales por explosivo

Una vez realizado el cálculo de la zona activa se marcó la misma directamente en la chapa, utilizando un lápiz cristalográfico, como se muestra en la figura 3, de modo que permitiera identificar la zona donde se colocó el explosivo, para que actuara directamente sobre la misma.

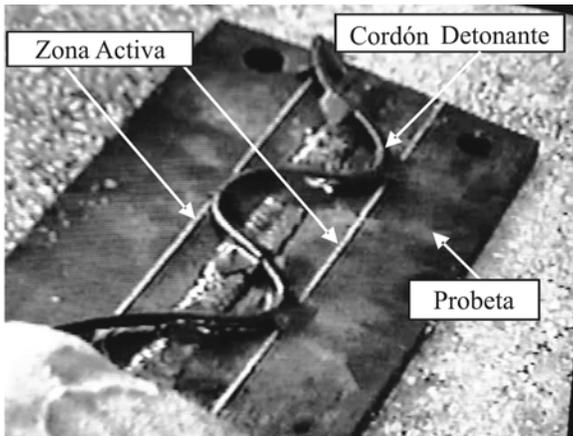


**Figura 3.** Zona activa (Bpl).

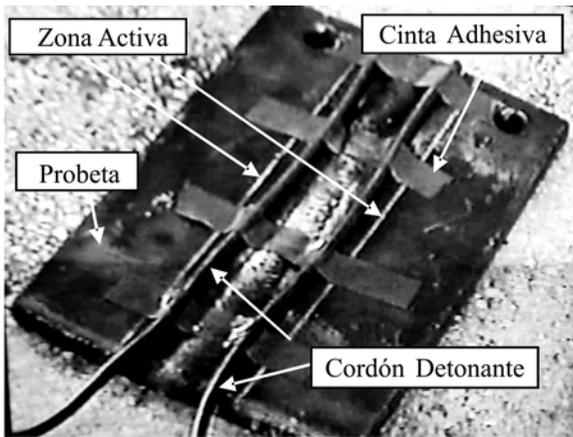
Existen diferentes formas de colocación del explosivo (Petushkov, 2001; Titov *et al.* 2002; Petushkof, *et al.* 1976); en este estudio se utilizaron dos variantes de disposición del cordón detonante:

- ✓ **Variante I:** Disposición sinusoidal del cordón detonante sobre el cordón de soldadura (figura 4).
- ✓ **Variante II:** Disposición de dos hilos paralelos del cordón detonante al cordón de soldadura (figura 5).

Se trazó en la superficie de la probeta la ubicación del explosivo y se dispuso el cordón detonante por encima del trazo, con el empleo de cinta adhesiva.



**Figura 4.** Disposición Sinusoidal.



**Figura 5.** Disposición dos Hilos.

Durante la realización de toda la etapa experimental se cumplieron las medidas de seguridad establecidas para el trabajo con explosivos. Las probetas se llevaron al polígono de pruebas, se situaron sobre apoyo plano en el lugar, con las condiciones requeridas para efectuar la detonación.

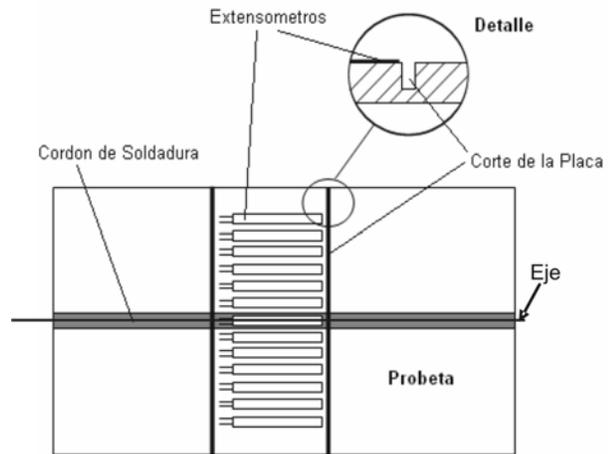
### Medición de las tensiones residuales

La medición de las tensiones residuales se realizó mediante extensómetros utilizando el puente de wheastone como

circuito fundamental, para medir de forma directa el desequilibrio eléctrico que se produce tras la deformación de las galgas (Poblet, *et al.* 1983; Kandil, *et al.* 2001; Withers, *et al.* 2001).

Los extensómetros fueron pegados en el centro de las probetas paralelos al cordón de soldadura, como se puede observar en la figura 6. En ambas variantes de aplicación del explosivo, en la dirección del cordón de soldadura, al cortar por delante y por detrás de ellos permitió medir el valor de las tensiones residuales longitudinales antes y después de la detonación de la carga explosiva.

La preparación de la superficie de la probeta y la fijación de los extensómetros para efectuar las mediciones se realizó siguiendo los procedimientos establecidos para este fin. Luego de tener los extensómetros adheridos a la superficie de la probeta se pegaron contactos eléctricos para evitar el deterioro de los sensores y se recubrió con parafina. Se utilizó un conmutador a fin de medir la variación de voltaje de los seis extensómetros, cada vez que se requería para calcular las tensiones residuales longitudinales ( $\sigma_x$ ).



**Figura 6.** Colocación de los Extensómetros.

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados del cálculo de las tensiones residuales longitudinales ( $\sigma_x$ ) de las probetas antes de aplicarles el tratamiento con explosivos y después de hacerlo, en ambas variantes, utilizadas con colocación del cordón detonante, se pueden observar en la tabla 2.

Estos valores de  $\sigma_x$  antes de aplicarle el tratamiento con explosivo, no muestran variaciones significativas de sus valores de tensión residual medidos, oscilando de un valor mínimo de 383.96 MPa en la probeta A hasta un máximo de 418.29 MPa en la probeta D sobre el cordón de soldadura, esto comprueba la homogeneidad de las condiciones en que se soldaron las probetas, por lo que se puede asegurar que el dispositivo diseñado y construido para lograr el embridamiento necesario para el surgimiento de las tensiones residuales, funcionó correctamente.

**Tabla 2.** Valores de las tensiones residuales longitudinales  $\sigma_x$  (MPa).

		Probetas en la variante de disposición sinusoidal					
		Probeta A		Probeta B		Probeta C	
		Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Distancia al centro (eje) del Cordón de Soldadura (mm)	0	383.96	177.55	372.48	163.22	406.83	166.08
	10	309.49	166.09	298.01	154.63	292.27	154.63
	20	-28.62	-45.79	-22.89	-45.79	28.62	-40.07
	30	-183.29	-103.06	-183.29	-97.33	-171.83	-103.06
	40	-177.56	-68.70	-171.83	-62.97	-200.49	-62.97
	50	-131.71	-62.97	-120.25	-57.24	-189.02	-57.24
	60	-103.06	-57.24	-131.71	-45.79	-166.09	-45.79
		Probetas en la variante de disposición dos hilos					
		Probeta D		Probeta E		Probeta F	
		Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Distancia al centro (eje) del Cordón de Soldadura (mm)	0	418.29	223.37	401.1	209.03	395.43	220.5
	10	298.01	183.29	286.54	166.09	309.49	177.56
	20	40.07	11.45	22.89	5.72	-28.62	5.73
	30	-171.83	-97.33	-160.36	-91.60	-183.29	-91.60
	40	-200.49	-68.70	-206.22	-80.15	-200.49	-80.15
	50	-194.76	-28.62	-194.76	-17.17	-120.25	-17.17
	60	-177.56	5.74	-183.29	-5.72	-103.06	0.00

Nota:

Los valores positivos corresponden a las tensiones residuales de tracción y los negativos a las de compresión.

Antes: se refiere a los valores antes de aplicar el tratamiento

Después: se refiere a los valores después de aplicar el tratamiento.

Las variaciones de las tensiones residuales antes y después de aplicarle explosivo demuestran que el método propuesto tiene efectividad en el alivio de las tensiones residuales en la soldadura. Por ejemplo, la probeta D muestra una tensión inicial de 418.29 MPa sobre el cordón de soldadura, al ser sometida al tratamiento, disminuyó hasta 223.37 MPa, lo que representa el 53,4% con respecto a las tensiones residuales iniciales. Esta variación se puede observar en la figura 7, la cual muestra la distribución promedio de las probetas en ambas variantes de las tensiones residuales longitudinales, que va desde un valor máximo de tracción en el centro del cordón de soldadura, luego comienza a disminuir a medida que se va separando del mismo, hasta pasar al campo de las tensiones residuales de compresión, la suma total de estas tensiones es igual a cero.

La diferencia entre utilizar una variante u otra es mínima (disposición sinusoidal variante I o hilos paralelos variante II del cordón detonante), sin embargo, aplicar la variante I (aproximadamente 350 mm de longitud de cordón detonante), tiene ventajas, ya que con menos cantidad de explosivos por metro lineal, se obtienen los mismos resultados que si

se aplicara la variante II (aproximadamente 400 mm de longitud de cordón detonante), e inclusive ligeramente mejor. Esto se observa, por ejemplo, en la probeta C con disposición sinusoidal, donde de 406,83 MPa disminuye a 166.08 MPa, lo que representa un 59.2% de atenuación de las tensiones residuales iniciales. Igualmente en la probeta D con disposición dos hilos, donde de 418.29 MPa disminuye a 223.37 MPa, lo que representa el 53,4% de atenuación de las tensiones residuales iniciales.

El efecto de mejorar las propiedades de las uniones soldadas en sentido general se logra porque la onda de choque de compresión, que surge como resultado de la detonación de la carga explosiva, colocada sobre la zona afectada térmicamente provoca deformaciones plásticas locales del metal, llevando a la formación de recalado en las capas superficiales y tensiones residuales de compresión. Además, bajo la acción de la carga explosiva cambia el campo de tensiones residuales en un volumen comparativamente grande de la unión soldada (Jinxiang, *et al.* 2005; Petushkov, *et al.* 2001).

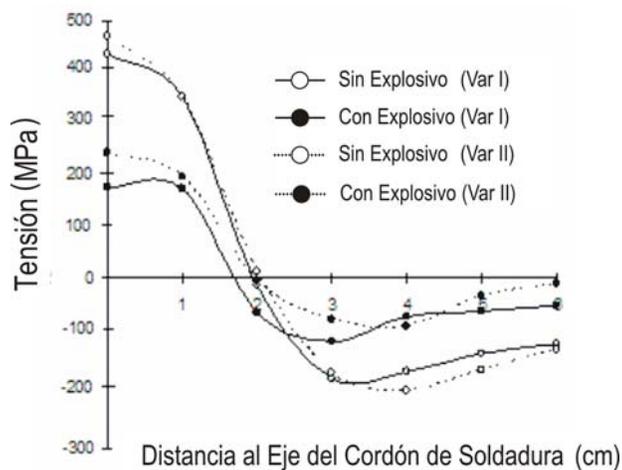


Figura 7. Distribución de las tensiones residuales.

## CONCLUSIONES

Entre las dos variantes utilizadas (disposición sinusoidal y dos hilos paralelos del cordón detonante), la más efectiva y a su vez la más económica es la variante I (disposición sinusoidal), ya que con menor consumo de explosivos por metro lineal, se obtienen resultados similares.

El rango de variación de las tensiones residuales al aplicarle el tratamiento con explosivo, demostró que las probetas disminuyeron entre un 45-55 % en su nivel de esfuerzos residuales, lo cual evidencia la efectividad del método estudiado.

## AGRADECIMIENTOS

El autor quiere expresar su agradecimiento a los Doctores Daniel Pilo de la Universidad Simón Bolívar de Venezuela y Amado Cruz Crespo de la Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas de Cuba, quienes con sus oportunos consejos, experiencia y paciencia contribuyeron a la conclusión de este trabajo.

## REFERENCIAS

DIDYK R. P., V'YUNNIK, A. N., ZIL, V. V. AND MASAKOVSKII, A. (1994). "Explosive treatment as a means of redistribution of residual stresses in machine parts», Problemy Prochnosti, No. 11, pp. 50-54.

FROLOV, V. V. (1988). «Teoría de los procesos», Bichaia Escola.

GLIZMANENKO, D.L., (1968). «Soldadura y Corte de los Metales», Instituto del Libro, La Habana, pp. 124-145.

GULIAEV, A. P. (1977). «Metalografía», Tomo II, Editorial MIR Moscú, pp. 163-176.

JINXIANG, Z., KAISHIN, L., KAI, Z., XIAOJIE, L., YING, L. AND KAI, Z. (2005). «A study on the relief of residual stresses in weldments with explosive treatment», International Journal of Solids and Structures, Volume 42, Issue 13, June 2005, Pages 3794-3806.

KOHLER, JOSEF Y MEYER, RUDOLF. «Explosives». (1987). 3rd edition, VHC Publishers, New York. pp.83.

KANDIL, F.A., LORD, J.D., FRY, A.T. & GRANT, P.V. (2001). «A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection», NPL Materials Centre, UK.

MASUBUCHI, K. (1980). «Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences», Massachusetts Institute of Tecnology, USA, pp.88-110, pp. 112-145, pp. 148-187, pp. 328-335.

Mead, D.J. (2003). «Vibration and Buckling of Flat Free-Free Plates under non-Uniform in-Plane Thermal Stresses». Journal of Sound and Vibration. Vol. 260, pp. 141-165.

MOCHIZUKI, M., MATSUSHIMA, S., TOYODA, M. & THAULOW, C. (2005). «Fundamental study of thermal stress generation during welding heat cycles. Studies on numerical simulation of temperature, microstructure and thermal stress histories during welding, and their application to welded structures». Welding International. Vol. 19 (9), pp. 702-710.

PETUSHKOF, G., KUDINOF, B. M., TRUFIKOF, B. Y. (1976). «Parámetros de cargas de sustancias explosivas para eliminación de tensiones residuales soldadas a tope», Avtomaticheskaja Esvarca, No 1.

PETUSHKOV, V.G. (2003). «Peculiarities of explosion treatment of the circumferential weld on pipe filled with liquid.», Paton Welding Journal, No.6, pp. 14-16.

TITOV, V.A., BRYZGALIN, A.G. AND PETUSHKOV, V.G. (2002). «Limiting thickness of welded joints to be explosion treated.», Paton Welding Journal, No.1, pp. 20-27.

PETUSHKOV, V.G. AND TITOV, V.A. (2001). «Parameters of shock-wave loading used to relieve residual welding stresses by explosion treatment», Paton Welding Journal, No.4, Pp. 57.

PETUSHKOV, V.G. (2003). «Residual stresses in explosion treated pipes.», Paton Welding Journal, No. 12, pp 2.

POBLET, M. J. Y OTROS. (1983). «Transductores y medidores electrónicos», Revista Mundo Electrónico, 2da edición.

SCHMIDT, C. G. Y SHOCKEY, D. A. (1992). «*Reducción de tensiones residuales en juntas soldadas con tratamientos con explosivo*», Suplemento de la Welding Journal, Diciembre, pp. 443-446.

STANDARD SPECIFICATION FOR CARBON STRUCTURAL STEEL. (2001). A36/A 36M-00a.

TRUFIAKOV, B. I., MIJIEV, P. P., KUDINOV, V. M., PETUSHKOV, V. G., BEREZINA, H. V., BUSHA, O. I., LEVEDETS, V. K. (1976). «*Aumento de la resistencia al agotamiento de las uniones soldadas, con la utilización de cargas explosivas.*», Paton Welding Journal. No.5.

WITHERS, P. J. & BHADSHIA, H. K. D. H. (2001). «*Residual Stress – I: Measurement techniques*». Materials Science and Technology. Vol. 17, pp. 355-365.