

SELECCIÓN DE ELECTRODOS PARA LA RECUPERACIÓN DE LAS TAPAS DE CILINDROS DEL MOTOR DE LA LOCOMOTORA TGM8K

ELECTRODE SELECTION FOR RECOVERY OF THE CYLINDER LIDS OF THE TGM8K LOCOMOTIVE ENGINE

Pablo Oñoz Gutiérrez^{1}, Manuel Rodríguez Pérez² y Emerio Fadruga Hernández¹*

¹ Facultad de Electromecánica. Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas (CEEFFREP). Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz". Carretera Circunvalación Norte km 5 ½, Camagüey, Cuba.

² Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS). Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

Recibido: Febrero 15, 2016; Revisado: Julio 11, 2016; Aceptado: Septiembre 14, 2016

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue determinar el electrodo más adecuado para realizar la recuperación de las tapas de cilindros (culatas) de las locomotoras TGM8K, aplicando la soldadura manual por arco eléctrico. Se prepararon probetas de hierro fundido nodular, obtenidas de una culata desechada, las cuales fueron soldadas con dos tipos de electrodos, ENi-CI (UTP8) y ENiFe-CI (UTP86FN), siguiendo una tecnología de soldadura apropiada. Las probetas fueron sometidas a ensayo de fatiga térmica en una instalación experimental creada con este objetivo, en la cual se simuló un proceso de calentamiento y enfriamiento más severo que en las condiciones de trabajo de la culata. Durante el ensayo de fatiga térmica, en las probetas soldadas con electrodos ENi-CI surgieron grietas en la zona de influencia térmica, al cabo de 145 ciclos; mientras que en las soldadas con electrodos ENiFe-CI se manifestaron a los 585 ciclos como promedio. Basado en los resultados del estudio, se concluye que los electrodos ENiFe-CI son los más apropiados para la recuperación de las tapas de los cilindros.

Palabras clave: electrodos, recuperación, soldadura, tapa de cilindro, hierro fundido, fatiga térmica

Copyright © 2017. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Pablo Oñoz, Email: pablo.onoz@reduc.edu.cu

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the best-suited electrode to carry out the recovery of cylinder lids (cylinders heads) of the TGM8K locomotives, by applying manual welding for electric arc. The test specimens of nodular cast iron, obtained from a discarded head, which were welded with two types electrodes, ENi-CI (UTP8) and ENiFe-CI (UTP86FN) following a technology of appropriate welding were prepared. The specimens were subject of thermic fatigue tests in an experimental installation created with this purpose, in which a process of heating and more severe cooling than in the head working conditions was simulated. During the thermic fatigue tests, in the specimens welded with electrodes ENi-CI appeared cracks at the thermic influence zone after 145 cycles, while in the specimens welded with electrodes ENiFe-CI, appeared at the 585 cycles on average. Based on the study results, the authors conclude that ENiFe-CI electrodes are the best-suited for the recovery of the cylinder lids.

Key words: electrodes, recovery, welding, cylinder lid, cast iron, thermic fatigue.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en Cuba se mantienen en explotación un grupo de locomotoras de procedencia soviética tipo TGM8K. La salida de servicio de estas locomotoras ocurre con mucha frecuencia por roturas y desperfectos en diferentes agregados del motor. Las tapas de los cilindros son una de las principales piezas que originan la parada de las locomotoras. Según la AIN (2010) estas piezas son deficitarias en el país y deben ser adquiridas por un valor, que oscila alrededor de los cinco mil dólares en el mercado internacional. Debido a la escasez de recursos financieros, para adquirir la cantidad de culatas requeridas, se hace necesario recurrir a la recuperación de estas piezas como una vía de reducir los gastos de mantenimiento.

La tapa de los cilindros o culata es la parte del motor que cubre el bloque de cilindros por la parte superior. Esta contiene los conductos por los que entran y salen los gases al motor, las canalizaciones para la circulación del agua refrigerante, y además aloja el mecanismo de la distribución. Se trata de uno de los elementos más complejos del motor pues, además de lo mencionado, debe soportar elevados esfuerzos térmicos, la presión de los gases producidos en la cámara de compresión, los golpes de las válvulas, las tensiones a causa de las altas temperaturas y las dilataciones irregulares.

La recuperación de las tapas de los cilindros de la locomotora TGM8K, mediante la soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestidos (SMAW), en la actualidad se realiza de forma empírica, sin una fundamentación experimental que justifique el tipo de electrodo y el régimen de soldadura adecuado. En la selección del tipo de electrodo no se consideran las condiciones de explotación de la unión soldada durante el funcionamiento de la pieza. En particular para este caso, ocurre en un régimen de calentamiento y enfriamiento continuo, por lo que es frecuente la formación de grietas en la unión soldada y el consiguiente fallo de la pieza.

Lo explicado permite deducir la necesidad de estudiar el efecto de la composición del material de aporte, sobre la sensibilidad al agrietamiento de la unión soldada. De igual modo es importante definir el tipo de electrodo más adecuado para la soldadura del

hierro fundido, empleado en la recuperación de las tapas de los cilindros de las locomotoras TGM8K.

El comportamiento de las uniones soldadas obtenidas durante la recuperación de piezas agrietadas en hierros, fundidos nodulares o dúctiles sometidos a condiciones de variaciones de temperatura, no ha sido estudiado suficientemente. En el caso particular de las tapas de los cilindros de las locomotoras no se encontraron evidencias de que este estudio se haya realizado anteriormente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el trabajo de investigación se seleccionaron dos tipos de electrodos, empleados con mucha frecuencia en la recuperación de las culatas, el ENi-CI y ENiFe-CI según OERLIKOM (2014). Se diseñaron y fabricaron probetas del hierro fundido nodular obtenido de una misma culata; estableciéndose un régimen apropiado para la soldadura con precalentamiento según Rodríguez (2013).

Para las culatas objeto de estudio las condiciones de temperatura, según Oñoz, (2007), son las siguientes: la máxima temperatura es de 565 °C en una zona de la superficie interior de la cámara de combustión, y la mínima es de 90 °C en el exterior de la pieza. Por lo que se obtiene un gradiente global de 475 °C aproximadamente en condiciones normales de explotación. Sin embargo, en la superficie interior que corresponde a la cámara de combustión se manifiesta una marcada diferencia de temperaturas entre las zonas de las válvulas de admisión y las de escape. En la primera la temperatura es de 280...350 °C, mientras que en la segunda se alcanza un máximo de 565 °C.

2.1 Instalación para el ensayo de fatiga térmica

El análisis del comportamiento de las uniones soldadas, en condiciones de ciclaje térmico, requirió construir una instalación experimental. Esta permitió simular la variación de temperatura en un rango aproximado al de trabajo de las culatas, para lo cual se consideraron recomendaciones de la bibliografía, Santillan (2004). La instalación, figura 1, basa su funcionamiento en el calentamiento de la probeta, con una llama oxiacetilénica, hasta alcanzar la temperatura de 650 °C y en su posterior enfriamiento en un chorro de agua, con un flujo de 12 L/min. La repetición de los ciclos de calentamiento y enfriamiento se realiza de forma automática. La temperatura se mide de forma continua con un termopar insertado en la base de la probeta y de forma periódica con el pirómetro Thermopoint 80 AGA.

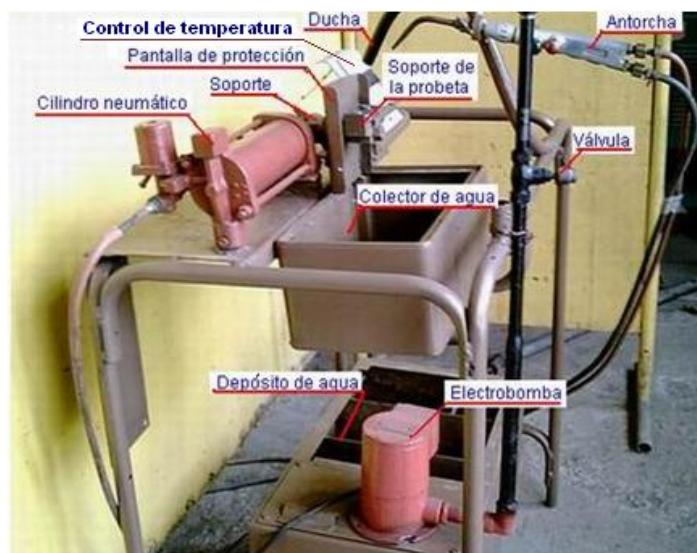


Figura 1. Instalación para ensayo de fatiga térmica. Fuente: Autores

2.2 Diseño de las probetas para el ensayo de fatiga térmica

La resistencia al agrietamiento, de una aleación que trabaja en condiciones de calentamiento y enfriamiento continuo, se puede comprobar mediante ensayos acelerados de fatiga térmica. Para esto se preparan probetas extraídas de las piezas u obtenidas de sus semiproductos. En este trabajo fue necesario obtener las muestras de las propias piezas, ya que estas no se fabrican en el país.

Las probetas para los ensayos se obtuvieron de las secciones laterales de la culata, previamente cortadas mediante fresado. Para el diseño de las probetas se planteó como objetivo garantizar el empotramiento de la unión soldada. Se tomó como modelo el tabique divisor de las válvulas de escape, por ser el lugar que con más frecuencia se repara por soldadura en las culatas. Para simular estas condiciones en las probetas, figura 2, se taladraron dos agujeros de 10 mm de diámetro separados por un tabique de 10 mm de ancho, situado en el centro de las probetas. El tabique se biseló para simular la presencia de una grieta.

2.3 Selección de los electrodos y el régimen de soldadura

Para la soldadura de los hierros fundidos nodulares, según CIME (1996) y Rodríguez (1983), fundamentalmente se emplean electrodos base níquel. Estos garantizan la obtención de buenas propiedades de resistencia en la unión soldada.

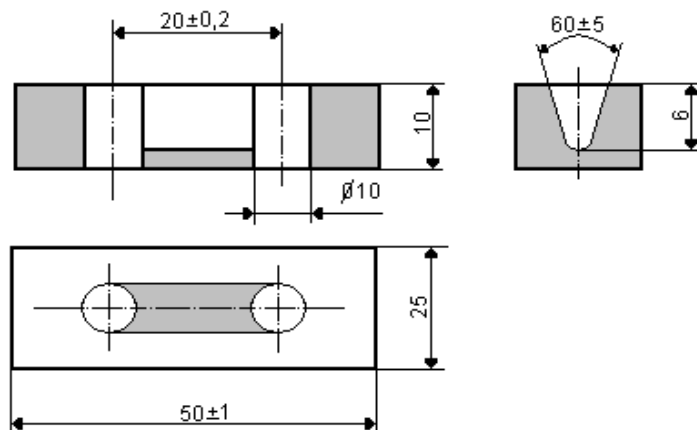


Figura 2. Probeta para el ensayo de fatiga térmica de las uniones soldadas

Los electrodos base níquel, según norma AWS A5.15:1991, se clasifican en: electrodos de níquel puro (ENi-CI, ENi-CI-A), electrodos de níquel-hierro (ENiFe-CI, ENiFe-CI-A) y electrodos níquel-cobre (ENiCu-A, ENiCu-B).

Los manuales de las firmas productoras de estos electrodos contienen indicaciones de aplicación general, con énfasis en el tipo de hierro fundido en particular. No obstante no se especifican condiciones de explotación de las piezas, tales como la temperatura de trabajo y el grado de empotramiento de la unión. Sin embargo, las condiciones de trabajo de la unión soldada son importantes al seleccionar el electrodo adecuado, pues puede ocurrir que con un mismo tipo de electrodo se obtengan buenos resultados en un caso y en otro no, aun siendo las piezas del mismo tipo de hierro fundido.

En el caso de las piezas, que trabajan en condiciones de variaciones de temperatura (ciclaje térmico) y con cargas mecánicas variables, es importante considerar estas condiciones al seleccionar el tipo de electrodo para la soldadura de recuperación.

Las tapas de los cilindros del motor de la locomotora TGM8-K trabajan en las condiciones planteadas anteriormente y la selección del electrodo más adecuado para su recuperación debe realizarse sobre la base de ensayos experimentales.

Para los ensayos experimentales se seleccionaron dos tipos de electrodos base níquel de los más comercializados en el país y con frecuente empleo en los trabajos de recuperación por parte de la firma UTP. Para evaluar los electrodos de tipo ENi-CI se tomó el electrodo de marca UTP 8, para el tipo ENiFe-CI el electrodo UTP 86FN .

En la soldadura de las probetas se emplearon los consumibles mencionados anteriormente. El régimen de soldadura seleccionado se basó en las recomendaciones del fabricante Böhler Welding Group, UTP (2013) y lo establecido en la bibliografía, fundamentalmente por la AWS A5.15, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Régimen de soldadura para las probetas de ensayo

<i>No</i>	<i>Tipo de electrodo</i>	<i>De, (mm)</i>	<i>Is, (A)</i>	<i>Ua, (V)</i>	<i>Vs, (cm/s)</i>	<i>At, (kJ/mm)</i>	<i>Tp.(°C)</i>
1	ENi-CI	4	120	20	0,14	1,45	600...650
2	EFeNi-CI-1	4	120	20	0,14	1,45	600...650

Donde:

De - diámetro del núcleo metálico del electrodo, mm.

Is - intensidad de la corriente de soldadura, A

Ua - tensión del arco, V

Vs – velocidad de soldadura media, cm/s.

At – aporte térmico, kJ/mm.

Tp – temperatura de precalentamiento, °C.

En todos los casos, las soldaduras se realizaron con corriente directa con polaridad normal y con el empleo del rectificador AC/CD 250 de la firma CEA. El secado y conservación de los electrodos se realizó según las indicaciones del fabricante. Las probetas, una vez completada la soldadura, se colocaron en un horno donde se enfriaron hasta la temperatura ambiente. Posteriormente fueron inspeccionadas mediante rayos X y no se observaron defectos que invalidaran la calidad de las uniones soldadas.

2.4 Ensayo de fatiga térmica

Cada probeta con su réplica fue sometida, primeramente, a un calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 600...650 °C en la unión soldada, utilizando una llama oxiacetilénica de tipo reductora. Posteriormente, de forma inmediata se enfriaba con agua, figura 3. Esta secuencia de ciclos se aplicó hasta que aparecieron grietas en las probetas. La inspección se realizó de forma visual con ayuda de una lupa.

La resistencia al agrietamiento de la unión soldada fue evaluada a través de la cantidad de ciclos que esta resistió sin que aparecieran grietas.



Figura 3. Secuencia del ensayo de fatiga térmica. Fuente: Autores

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales del ensayo de fatiga térmica de las probetas soldadas con los electrodos ENi-CI y ENiFe-CI se muestran en la tabla 2, apreciándose la cantidad de ciclos que resistieron las probetas sin que aparecieran las grietas producto de las variaciones de temperatura.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de fatiga térmica.

No	Tipo de electrodo	Marca comercial	Probetas	Cantidad de ciclos	Promedio
1	ENi-CI	UTP 8	A	130	145
			A1	160	
2	EFeNi-CI	UTP84FN	B	570	585
			B1	600	

La inspección realizada a las muestras reveló que las grietas están localizadas en la zona de influencia térmica, específicamente en la frontera divisoria con la zona fundida, tal como se observa en la figura 4.



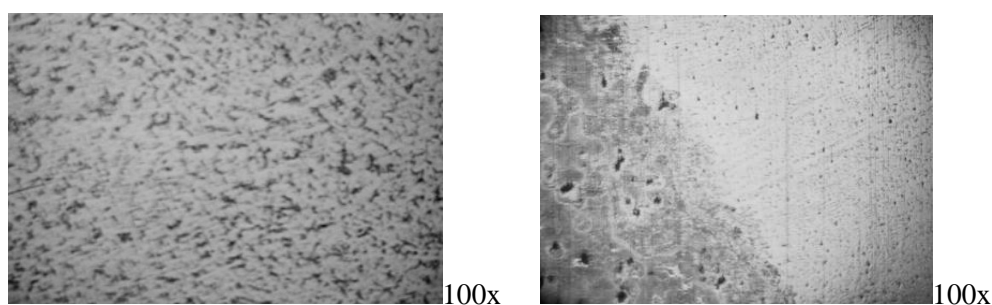
Figura 4. Probetas sometidas a ensayos de fatiga térmica. Fuente: Autores

Según Rodríguez (2013), para eliminar las grietas, las estructuras duras y frágiles en el metal de la unión, y garantizar la obtención de estructuras dúctiles, se requiere una composición química determinada, así como condiciones de enfriamiento propicias

para desarrollar el proceso de grafitización de la forma más completa posible. En las uniones soldadas para evitar la formación de estructuras de ledeburita es necesario asegurar un mayor contenido de carbono y de silicio. En condiciones de soldadura el elemento que mayor poder de grafitización tiene es el carbono.

Como se aprecia en la tabla 2 la unión soldada obtenida, con el electrodo tipo ENiFeCI de marca UTP86FN, fue la que mayor cantidad de ciclos resistió bajo las condiciones de ensayo sin presentar agrietamiento.

Los electrodos tipo ENiFe-CI poseen un contenido de carbono de 1...2%, superior al de los ENi-CI (<1%). Esta afirmación ha sido corroborada en el análisis de la composición de los consumibles ofertados por varias firmas OERLICON (2014), UTP (2013), HOBART (2012), INDURA (2007). Esto explica que en la zona fundida de este tipo de electrodo se observe un mayor contenido de grafito, lo que influye de forma positiva en las propiedades de la unión al disminuir las tensiones de contracción y reducir la porosidad y el agrietamiento en caliente. También disminuye la temperatura de fusión del electrodo por lo que se requiere de menor aporte térmico durante la soldadura y se logra una mejor estabilidad en el arco. Este comportamiento se pone de manifiesto en el análisis metalográfico realizado a las muestras soldadas de los diferentes tipos de electrodos, donde se puede apreciar en la figura 5A, que la cantidad de grafito en la zona fundida es mayor que el observado en la figura 5B.



A) Electrodo ENiFe-CI (Zona fundida) B) Electrodo ENi-CI (Metal base + Zona fundida)

Figura 5. Microestructura de la unión soldadura. Fuente: Autores

Este resultado está en correspondencia con los obtenidos por Molodyx (1993), Rodríguez (2013), los cuales plantean, que con electrodos ENiFe se obtiene en la zona fundida una solución sólida con una gran cantidad de nódulos de grafito. La forma nodular del grafito se debe a la presencia del magnesio introducido en la aleación.

Cuando la unión soldada trabaja en condiciones de grandes variaciones de temperatura, como el caso del ensayo de fatiga térmica, en ella se genera un alto nivel de tensiones que provocan el agrietamiento de la misma.

Uno de los factores que influyen en la resistencia al agrietamiento bajo estas condiciones de trabajo es la composición de la unión soldada. Al ocurrir el calentamiento se produce una dilatación no uniforme de la misma, debido a que en la unión existe una combinación de aleaciones, en la zona fundida una mezcla de metal de aporte (electrodos base níquel) y metal base (hierro fundido), y en la zona de influencia térmica el metal base está constituido por el hierro fundido, por lo tanto las magnitudes de dilatación son diferentes en cada zona.

Para este caso, la dilatación es mayor en la zona fundida, ya que el metal depositado posee un elevado contenido de níquel. Cuando se produce el calentamiento de la unión soldada, debido a la dilatación no uniforme, se genera un nivel de tensiones de compresión por parte del metal de la zona fundida sobre las capas de metal de la zona de influencia térmica. Bajo estas condiciones las tensiones no resultan peligrosas para la integridad de la unión, debido a que el hierro fundido trabaja bien bajo cargas de compresión y la plasticidad de la aleación es alta producto de la temperatura. Sin embargo, durante el enfriamiento el comportamiento es diferente y es el momento donde hay más peligro que aparezcan las grietas. Con el descenso de la temperatura se manifiesta una disminución de la plasticidad y ocurre la contracción del metal de la unión. Las zonas que anteriormente estaban sometidas a tensiones de compresión, ahora se cargan con tensiones de tracción que resultan muy peligrosas, dado que el hierro fundido tiene una baja resistencia a la tracción. La magnitud de estas tensiones depende del nivel de contracción que sufre la aleación.

Desde este punto de vista, se puede plantear que serán más resistentes a la formación de grietas, aquellas uniones soldadas donde la diferencia de dilatación entre sus partes sea menor. Los resultados obtenidos en la presente investigación son válidos, asociados a que el metal depositado por el electrodo ENiFe-CI posee un coeficiente de dilatación de $11,7...13,1 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, que resulta menor al del electrodo ENi-CI ($13,3...16,3 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) y más cercano al del hierro fundido dúctil, que es de $10,5 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Esto implica que con el electrodo ENiFe-CI se generan menores tensiones en la unión soldada y mayor resistencia al agrietamiento en condiciones de trabajo de grandes variaciones de temperatura.

Además, los electrodos tipo ENiFe-CI presentan una resistencia a la tracción del orden de 500 MPa y un límite de fluencia mayor de 300 MPa, lo que resulta superior al de los electrodos ENi-CI (300 MPa y 250 MPa respectivamente). Esto favorece la resistencia a la fatiga térmica del metal depositado por estos electrodos, dado que en las uniones soldadas expuestas a condiciones de trabajo de grandes variaciones de temperatura se generan tensiones de compresión y tracción que se repiten de forma cíclica. Resultará más resistente a la formación de grietas, aquella unión soldada en la que el metal depositado tenga mayor resistencia a la tracción con alto grado de plasticidad para contrarrestar estas tensiones. Por tanto, la mayor resistencia a la formación de grietas en el ensayo de fatiga térmica de las probetas soldadas con los electrodos ENiFe-CI, se debe a que el metal depositado por este tipo de electrodo tiene mayor resistencia a la tracción y ductilidad que el obtenido con el ENi-CI.

4. CONCLUSIONES

1. Se comprobó mediante ensayos de fatiga térmica la influencia de la composición química del metal depositado por los consumibles base níquel, empleados en la soldadura del hierro fundido de la tapa de los cilindros de la locomotora TGM8K, sobre la resistencia al agrietamiento de las uniones soldadas bajo ciclos continuos de calentamiento y enfriamiento, resultando cualitativamente superior el electrodo tipo ENiFe-CI.
2. La instalación experimental diseñada y fabricada para la evaluación de la resistencia a la fatiga térmica de uniones soldadas de hierro fundido, ha

demostrado su efectividad para este tipo de trabajo, la cual puede ser utilizada para otros trabajos de investigación relacionados con el estudio de depósitos de soldadura sometidos a variaciones de temperatura.

REFERENCIAS

- AIN., Notable aporte económico al recuperar piezas de locomotoras., 28 Oct. 2010. Recuperado el 10 de junio de 2014 de <http://www.erf.com.ar/2010/31102010.htm>
- AWS A5.15., American Welding Society, Welding HandBook, 8ª. Edición, Florida, 1991, pp. 140-149.
- Böhler Welding Group., UTP, Guía general de soldadura. Recuperado el 10 de junio de 2014 de <http://www.soldadurasespecialesutp.com/catálogo.pdf>
- CIME, Centro de Investigaciones Metalúrgicas, Recuperación de piezas por métodos de soldadura, Ed. Publicaciones IMAGO, Ciudad de La Habana, 1996, pp. 291-310.
- HOBART, Pocket welding guide., Ohio, USA, 2012, pp.92-93.
- INDURA, Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura., Argentina, 2007, pp.72-75.
- Molodyx, N., Vosstanovlenie detalei machin, Mashinoestroyeniye., Moskva, 1993, pp.104-119.
- OERLIKON, Manual de soldadura, Lima, 2014, pp.188-195.
- Oñoz, P., Evaluación de consumibles para la reparación por soldadura de las tapas de los cilindros de la locomotora TGM8-K según las condiciones de explotación a que están sometidas., Tesis presentada en opción al grado académico de Master en Ingeniería Mecánica, Especialidad Soldadura en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2007.
- Rodríguez, H., Metalurgia de la soldadura. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana, 1983, pp. 336-386.
- Rodríguez, H., Soldadura de hierros fundidos. Recomendaciones tecnológicas., Ciencias Holguín, Vol. 19, No. 4, 2013, pp. 31-41.
- Santillan, G., Diseño de un proceso para la evaluación del fenómeno de fatiga térmica en uniones soldadas., Memorias de la III Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica, COMEC 2004., Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Noviembre 2004.
- UTP, Soldaduras especiales para fabricación, reparación y mantenimiento., México, 2013, pp. 2-3.