



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

Diseño del proceso de tratamiento térmico con láser aplicado en cigüeñales

Ing. Orlando Damaso Bermúdez Rivera¹

Dra. Miriam Sánchez Pozos²

Correo electrónico:

Orlando.bermudez@macimex.com

miriam_snchez@yahoo.com

¹Manufacturera de Cigüeñales México y estudiante de maestría en CIATEQ.

²Universidad Autónoma del Estado de México



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

Diseño del proceso de tratamiento térmico con láser aplicado en cigüeñales

Ing. Orlando Damaso Bermúdez Rivera¹, Dra. Miriam Sánchez Pozos².

Resumen

El trabajo aquí descrito, demuestra las ventajas de realizar el proceso de temple por láser en un cigüeñal, aplicándolo a los apoyos y muñones, partes que por su alto desgaste necesitan aumentar sus propiedades mecánicas, una de las cuales es incrementar la dureza superficial para aumentar su ciclo de vida. Por ser la aplicación de láser un proceso de reciente creación para realizar el tratamiento térmico en cigüeñales, fue necesario realizar varios cálculos, así como pruebas para poder encontrar los valores más adecuados de los diferentes parámetros a controlar como son: velocidad de recorrido, diámetro del spot; todo esto con la finalidad de poder tener las características de calidad requeridas: profundidad de capa templada, dureza superficial, distorsión mínima. Logrando con esto, establecer los lineamientos para aplicarlos a un proceso de producción en línea.

Abstract

This work, show the advantages of make laser hardening process on a crankshaft, applying in mains and pins, that for their highest wear they need to increase their mechanical properties, one of which is to increase surface hardness to raise their life cycle. As the laser process is young, it was necessary to perform several tests to achieve the different parameters to control as: speed and spot diameter. All this in order to be able to have the required quality characteristics: hardened depth layer, surface hardness, low distortion. Achieving with this, establish guidelines for applying them in a production line.

Palabras clave

Láser, temple, dureza, cigüeñal.

1- Introducción

¹ Ing. Orlando Dámaso Bermúdez Rivera es Ingeniero de Procesos en Manufacturera de Cigüeñales México, Tenango, México. Orlando.bermudez@macimex.com.

² Dra. Miriam Sánchez Pozos Profesora- Investigadora en la Universidad Autónoma del Estado de México.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Un proceso importante para extender la vida útil del cigüeñal, es el tratamiento térmico por temple, y el proceso que tradicionalmente se ha empleado es el temple por inducción, el cuál debido al vertiginoso avance tecnológico podría ser reemplazado por nuevas técnicas que proporcionan notables ventajas.

Es conveniente mencionar la importancia que ha tenido el temple por inducción, ya que a través del tiempo ha sido uno de los procesos más utilizados para poder lograr endurecer las partes en contacto del cigüeñal, con el monoblock y la biela-manivela los cuales son: apoyo y muñones. Ambos sufren el mayor desgaste por fricción con los metales (material más suave utilizado en el ensamble del cigüeñal en el monoblock y con las bielas-manivelas), aunado a esto, dependiendo del tipo de aplicación del motor (HP), el esfuerzo al cual es sometido el cigüeñal es diferente, por lo que en este caso hablaremos de aquel cigüeñal utilizado para Motores con HP altos. Para poder reducir este desgaste y alargar la vida del cigüeñal, es necesario cambiar sus propiedades físicas y mecánicas, para lo cual a lo largo de los años se empleó con gran aceptación el temple por inducción.

Sin embargo, con el descubrimiento del láser y su aplicación a diferentes procesos industriales como: soldadura, corte de metal y el endurecimiento de los metales; se da la pauta para aplicarlo en el proceso de temple de los cigüeñales.

El temple por láser, ocupa una de las aplicaciones tecnológicas más innovadoras, por lo sencillo del proceso. El láser ofrece grandes ventajas como son:

- Zonas tratadas muy localizadas, sobre superficies complejas, con mínimas tensiones residuales.
- Se puede prescindir del proceso final de rectificado, ya que las deformaciones son mínimas y se puede cumplir con el run-out especificado, como indica Kennedy E. et. al [6].
- Se puede integrar directamente dentro de la cadena de producción sin la necesidad de temple adicional.
- No se necesitan grandes espacios para la máquina.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

- Se utiliza un solo cabezal laser para los diferentes diámetros (apoyos y muñones), sin importar el ancho de los mismos.
- No se utilizan operaciones de revenido, Orazi L. et. al. [7]

Si se hace la comparación del temple por inducción contra el temple por láser, se pueden observar grandes oportunidades de desarrollo del láser como medio alternativo del temple por inducción.

Lo descrito anteriormente hace que el temple por láser sea una opción de estudio para poder aplicarse en el temple de los cigüeñales.

En la actualidad el proceso de temple por láser no se ha logrado aplicar en cadenas de producción, sin embargo se han reportado diversos trabajos sobre las aplicaciones logradas en pequeños cigüeñales, como los utilizados en el compresor de los frenos de carros pesados Shariff S M, et. al. [1]. Esto hace que sea interesante demostrar la factibilidad de aplicar el láser en el temple de nuestro cigüeñal, siendo este el tema de estudio de este documento.

Nomenclatura.

T	Temperatura superficial (K)
z	Profundidad perpendicular desde la superficie (m)
T_0	Temperatura de la placa antes del tratamiento láser (K)
A	Absorbancia (%)
q	Potencia láser (W)
v	Velocidad del barrido del haz (ms^{-1})
ρ	Densidad (kgm^{-3})
C_p	Calor específico ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
k	Conductividad térmica ($\text{Jm}^{-1}\text{sK}^{-1}$)



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

- α Difusividad térmica (m^2/s)
- D Diámetro del haz (m)
- e Base de los logaritmos naturales (2.718)
- z_0 Parámetro que mide la distancia sobre la cual el calor puede difundir durante el tiempo de interacción D/ν

2- Descripción del Método

Para el presente estudio es importante conocer las características termofísicas del cigüeñal, las cuales se muestran en la tabla 1 y tabla 2, estas propiedades son importantes, para lograr la transferencia de calor en la operación del láser. Así mismo, la temperatura superficial que se necesita para poder lograr la transformación de las propiedades, debe ser superior a 900 °C.

Tabla 1. Propiedades termofísicas del cigüeñal

ρ	Densidad (kgm^{-3})	7272
C_p	Calor específico ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	0.42
k	Conductividad térmica ($Jm^{-1}sK^{-1}$)	52
α	Difusividad térmica (m^2/s)	1.703

Tabla 2. Conductividad. Térmica (k) a diferentes °C

0 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C
73	67	62	55	45	40	36	35	36

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

El equipo láser y maquinaria (herramental) utilizado para realizar las pruebas tiene las siguientes características:

- láser de diodos 10 kW.
- Herramental con movimiento en los ejes básicos (x. y. z), así como rotación. (ver figura 1).

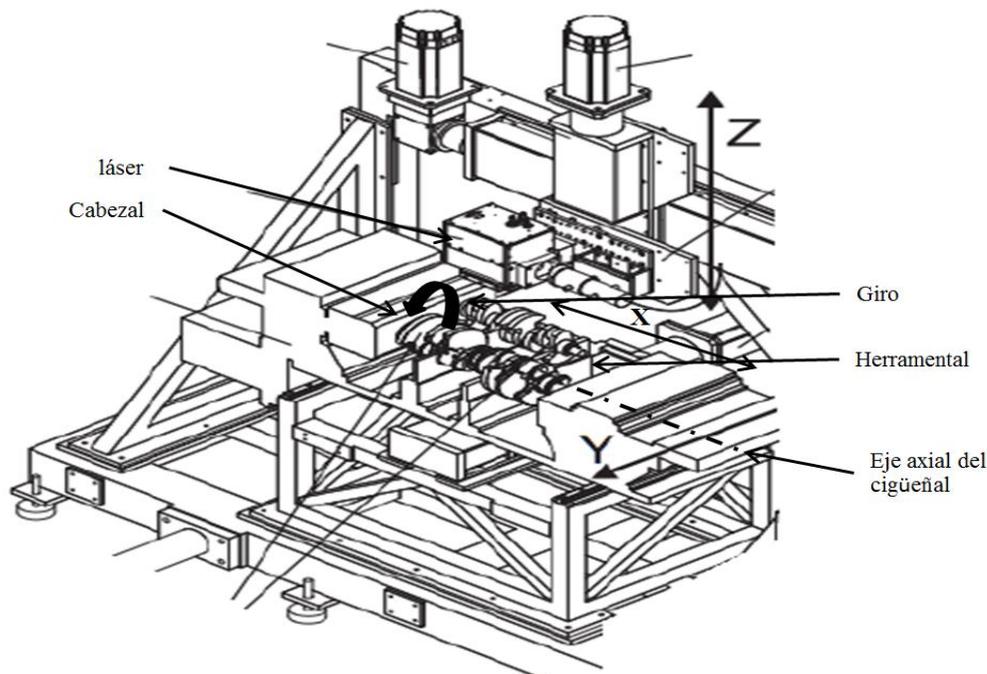


Figura 1. Láser y herramental.

Como se puede apreciar en la Figura 1, el cigüeñal se colocó en el cabezal para conservar el eje axial, y al templar los apoyos, los diámetros deberían estar concéntricos y conservar el mismo eje, el cabezal se encarga de hacer girar al



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

cigüeñal mientras el láser hace su recorrido a lo ancho de cada apoyo. Se coloca el herramental para poder desplazar los muñones, de tal manera que los muñones queden concéntricos al eje del cabezal y así hacer un movimiento similar al estar templando los apoyos. El movimiento del láser no representa un problema para poder lograr templar los apoyos y muñones, ya que solamente realiza un barrido a todo lo ancho de la pista, mientras el cigüeñal gira.

El problema radica en calcular los parámetros necesarios para poder realizar el temple por láser, tomando como referencia, los resultados actuales obtenidos por medio del temple por inducción, que son los siguientes:

- Profundidad de capa templada efectiva mínima de 1.0 mm.
- Dureza superficial de 45 - 58 HRC.
- Martensita al 100% en la profundidad 1.0 mm

Parámetros experimentales.

Para obtener los valores adecuados de tiempo (t) y temperatura (T), en la operación de temple por láser, se emplean las ecuaciones utilizadas por Sánchez Castillo, 2008 [2], así como los datos de la tabla 1.

En la tabla 3, se muestran los parámetros sugeridos del láser, según el trabajo de. Avila Apolinar, 2009 [3] para realizar los cálculos teóricos.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Tabla 3. Parámetros sugeridos del láser (Avila Apolinar, 2009)

Especificación	Diámetro de spot (mm)	Velocidad láser (m/s)	Potencia (W)
apoyos	3,4	0.010	2400
muñones	3,4	0.010	2400

Para determinar la temperatura superficial se tiene que [3]:

$$T = T_0 + \frac{\frac{Aq}{v}}{2\pi \cdot k[t(t+t_0)]^{\frac{1}{2}}} \exp - \left[\frac{(z+z_0)^2}{4\alpha t} \right] \quad (1)$$

El tiempo de interacción entre el haz y el metal se calculó como:

$$t = \frac{(z+z_0)^2}{2\alpha} \quad (2)$$

Dónde:

$$z_0^2 = \left[\frac{\pi}{2e} \right] \frac{\alpha D}{v} \quad (3)$$



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
 Multidisciplinario
 10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
 ISBN: 978-607-95635

Consideraciones:

$t_0 = 0$, (tiempo de interacción inicial del láser con el metal),

Absorbancia $A = 0.35$ [3 ,8]

3- Resultados

Resumen de resultados.

Al variar la potencia del láser, [5,10], se obtuvieron temperaturas de 1037, 1138 y 1240 (°C) (ver tabla 4), las cuales de acuerdo a los cálculos realizados, son adecuadas para lograr las propiedades mecánicas que se requieren, así como las transformaciones metalográficas en el material, así mismo, se hicieron los cálculos con potencias mayores y menores a la potencia sugerida, para identificar la variación de temperatura superficial.

	Resultado 1	Resultado 2	Resultado 3	Resultado 4	Resultado 5
Potencia (W)	2000	2200	2400	2600	2800
Temperatura (°C)	1037	1138	1240	1341	1443

Se seleccionó la potencia de 2000 W, con una temperatura de 1037 (°C) y se calculó la profundidad que tendrá la capa del temple por láser, y con ello se



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

analizó la disipación de calor a la profundidad obtenida. En la figura 2, se muestra la variación de temperatura en relación a la profundidad, se puede observar que a mayor profundidad, hay una disminución de temperatura, esto es por el efecto del calentamiento puntual y la diferencia de temperaturas del mismo cuerpo, la parte interna se ha mantenido fría, mientras que la superficie sufre un calentamiento rápido.

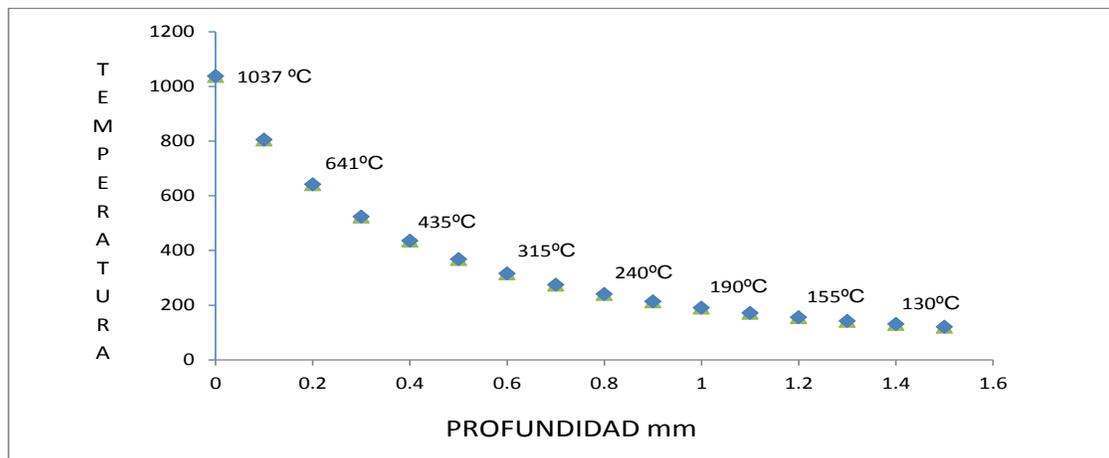


Figura 2. Variación de la temperatura en relación a la profundidad.

El medir la temperatura superficial, en el proceso de temple, ayuda de forma exacta a identificar si las condiciones iniciales con las cuales se llevó a cabo la operación son correctas, y es de gran ayuda para poder, tomar una decisión rápida de ajuste de parámetros. Por lo anterior, es que para nuestro propósito, se utilizó la temperatura superficial como parámetro principal, y con base en ello, se ajustaron los parámetros del láser y con ello la temperatura superficial del cigüeñal.

Con los datos anteriores, se realizaron las pruebas en apoyos y un muñones, tomando la lectura de la temperatura en la superficie, con un pirómetro, para monitorear la variación de este parámetro. Se monitoreo la potencia del láser



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

para evaluar lo calculado contra lo real. Al terminar, se seccionaron apoyos y muñones para realizar el análisis metalográfico de la capa templada.

Al medir la potencia requerida, se observó que en las zonas donde hay más masa alrededor del muñón, se necesita más potencia, ya que el calor por la cantidad de masa, se absorbe o disipa hacia los contrapesos que rodean al muñón.

Análisis metalográfico.

Se observó que la transformación de martensita es lograda hasta alcanzar 1 mm de profundidad. La dureza de 45 HRC se consigue a lo largo de 1.5 mm, la disminución de dureza menor a 45 HRC, ocurre cuando empiezan a aparecer ferrita no disuelta.

En la figura 3, se muestra el patrón que se obtuvo, con el láser, se puede observar que la geometría presente es diferente a la obtenida normalmente por el temple tradicional, Soriano C. [9]. Este patrón es similar tanto en el apoyo como en el muñón.

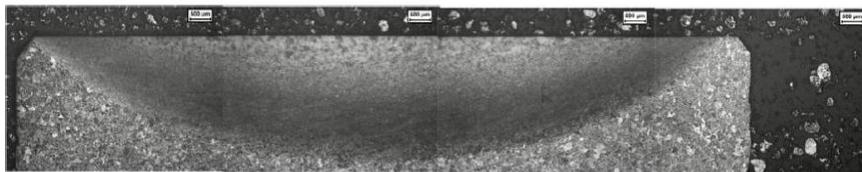


Figura 3. Perfil de la muestra templada por láser.

Se observa que la geometría alcanzada en el temple por láser, es similar a una media luna, principalmente redonda en las orillas, donde se aprecia como hay una disminución de capa templada, este es el efecto generado por la diferencia de



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

masas alrededor de la parte templada, al alejarse más de las orillas, la capa templada aumenta.

En la figura 4, se muestra una imagen del patrón obtenido con el temple tradicional.



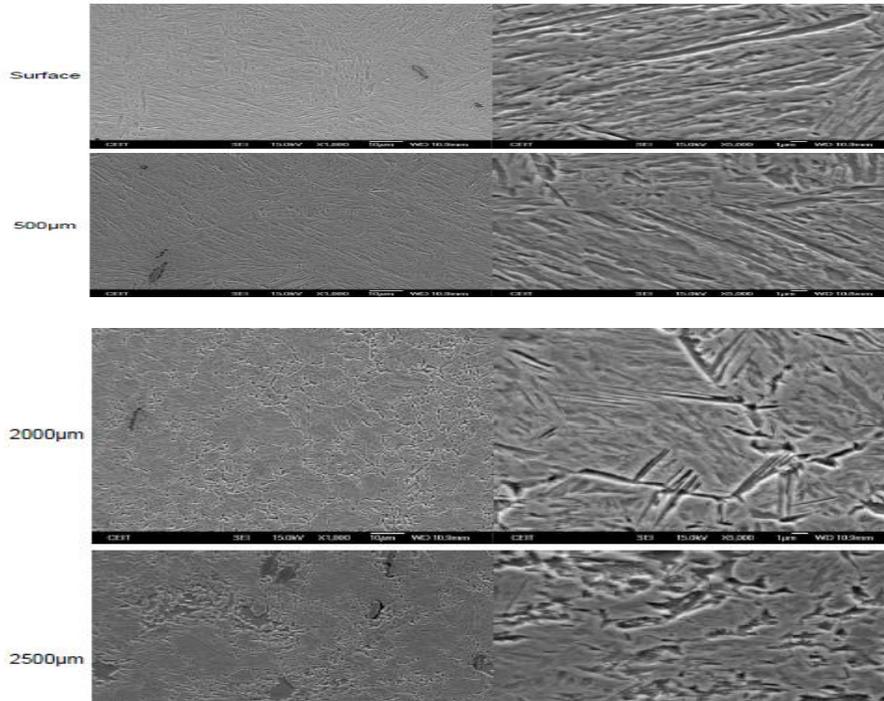
Figura 4. Patrón resultante de la capa templada por inducción

El patrón que se logra con el temple por inducción, presenta poco radio en las orillas, haciendo que la capa templada sea más uniforme.

El temple logro una microestructura pura en martensita, una zona con ferrita y también con ferrita no disuelta. En las orillas, se logra la profundidad de 1.5 mm. En la figura 5, se muestran las fotos tomadas de la microestructura.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635



4- Conclusiones

Los resultados demuestran que en la transformación lograda en la microestructura del material, principalmente en la zona central con una profundidad de 1.0 mm, se obtiene martensita al 100% con la cual se alcanza la dureza constante de 45 HRC. También se observa que a una profundidad de 1.5mm se empieza a apreciar ferrita, y con ello la dureza empieza a disminuir. En los lados de la capa templada, se obtienen los mismos resultados, logrando con esto, cumplir con las especificaciones requeridas, de acuerdo a las normas ASTM E18, SAE J423, y ASTM E384. Por lo cual es recomendable utilizar los siguientes valores de los parámetros calculados: potencia de 2000 W, con una temperatura de 1037 °C, velocidad .010 m/s. y diámetro de spot 3.4 mm, para poder implementar el láser como medio alternativo de temple en el cigüeñal.

Agradecimientos

El apoyo financiero de esta investigación fue provisto por Manufacturera de Cigüeñales de México (MACIMEX) y por el Consejo Nacional de Ciencia y



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Tecnología (CONACyT) para el desarrollo del proyecto denominado “MANUFACTURA INTELIGENTE ASISTIDA POR LÁSER (LEIA)” con clave C004-2011-01 CDTI España 162987; además, el primer autor agradece al Ing. Efrain Beltran (Coordinador de Ingeniería) por su confianza y apoyo en la culminación del presente artículo.

5- Bibliografía

- [1] Shariff S M, Tak Manish and Padmanabham G. “Laser surface hardening of crankshaft”. SAE Technical Paper,28-0053, (2009).
- [2] Sánchez Castillo A., Ruiz Marines, Carreón Garcidueñas H.G. “Propiedades del temple por láser aplicado al acero AISI-1045”. Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM, (2008), 939 – 944.
- [3] P.I. Avila Apolinar Adalberto. “Efecto de la temperatura superficial generada por un láser de diodos de alta potencia sobre las propiedades de un temple en un acero AISI-1045”. (tesis),Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, (2009), 37 – 50.
- [4] K.H. Leung Michael, Man H.C., Yu J.K. "Theoretical and experimental studies on laser transformation hardening of steel by customized beam ". ScienceDirect, International Journal of HEAT and MASS TRANSFER, 50(2007), 4600-4606.
- [5] Yang Ban-Quan, Chen Guang-Nan, Zhang Kun, Luo Geng-Xing, Xiao Jing-Ha. "A mechanical model for the quantification of the effect of laser quenching on CTOD in steels". Journal of Materials Processing Technology 209,(2009), 2180 -2185
- [6] Kennedy E., Byrne G., Collins D.N. “A review of the use of high power diode



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

lasers in surface hardening”. Journal of Materials Processing Technology 155 – 156, (2004), 1855 – 1860.

- [7] Orazi L., Fornunato A., Cuccolini G., Tani. G. “An efficient model for laser surface hardening of hypo-eutectoid steels”. Journal Applied Surface Science, 256, (2010), 1913 – 1919.
- [8] Bergström David. “The Absorption of laser light by Rough Metal Surfaces”. (tesis), Luleå University of Technology (2008), 19-49.
- [9] Soriano C., Leunda J., Lambarri J., García Nava V., Sanz C. “Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades”. Journal Applied surface Science 257, (2011), 7101 – 7106.
- [10] Mioković T., Schulze V., Vöhringer O., Löhe D. “ Influence of cyclic temperature changes on the microstructure of AISI 4140 after laser surface hardening”. Journal Acta Materialia 55, (2007), 589 – 599.