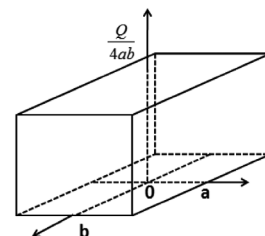


Aplicación de modelos simplificados para la determinación de ventanas de trabajo para el temple de aceros por láser

THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF LASER SURFACE HARDENING REQUIRES A PROPER DETERMINATION OF THE SPECIFIC WORKING PARAMETERS FOR EACH APPLICATION

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7079> | Recibido: 21/01/2014 • Aceptado: 15/04/2014



Francisco Cordovilla-Baró, Ángel García-Beltrán,
José Luis Ocaña-Moreno

Universidad Politécnica de Madrid. Centro Láser (CLUPM).
Edificio Tecnológico "La Arboleda" Campus Sur U.P.M. Carretera
de Valencia, km. 7,300 C.P. 28031 Madrid. Tfno: +34 91 332 42
francisco.cordovilla.baró@upm.es

ABSTRACT

- The laser is one of the processes for surface laser hardening and it is necessary to determine its working parameters in a proper way. This document studies two simplified models described in the bibliography and develops, from them, a practical methodology to estimate operative margins of its parameters (working windows) considering a wide set of process characteristics. By using the main relationships from the models along with the characteristics of a particular material, a wide variety of characteristic diagrams is obtained, some of which are finally used to get working windows corresponding to particular requirements
- **Keywords:** Laser hardening, process variables, simplified model, laser processing diagram, characteristic diagram, working windows.

RESUMEN

El láser es uno de los procesos para el temple superficial de piezas de acero y resulta necesario determinar sus parámetros de trabajo adecuados. El presente artículo estudia dos modelos simplificados descritos en la bibliografía, y desarrolla, a partir de ellos, una metodología práctica para la estimación de los márgenes operativos de sus parámetros (ventanas de trabajo) considerando un amplio conjunto de características del proceso. Utilizando las principales ecuaciones y relaciones de los modelos juntamente con las características de un material concreto, se obtiene una amplia variedad de diagramas característicos, algunos de los cuales finalmente se utilizan para obtener ventanas de trabajo correspondientes a unas especificaciones determinadas.

Palabras Clave: Temple con láser, variables del proceso, modelo simplificado, diagrama de proceso láser, diagrama característico, ventana de trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

El temple superficial de aceros con láser es una técnica que, a pesar de proporcionar soluciones de elevado valor tecnológico para componentes necesitados de una mejora en sus propiedades mecánicas (típicamente resistencia al desgaste), no ha penetrado suficientemente en el campo de las tecnologías de fabricación. Existen dificultades intrínsecas al propio proceso, ligadas al diseño de los ciclos térmicos adecuados en conexión con la evolución de las propiedades térmicas del material con la temperatura. No obstante, se considera que la falta de implantación de esta técnica ha venido muchas veces asociada con las dificultades existentes para una correcta selección de los parámetros del tratamiento basados en simulaciones numéricas realistas, absolutamente necesarias para predecir y evaluar los ciclos térmicos aplicados a las distintas zonas geométricas de los componentes tratados. Dichas simulaciones han sido una herramienta fundamental a la hora de la predicción de los ciclos térmicos y los autores han contribuido con trabajos previos en esta línea ([4], [5] y [6]). Sin embargo, en el caso de entornos industriales donde la complicación geométrica de los componentes no es excesiva, la utilización de la tecnología tampoco ha sido suficiente como consecuencia de la inexistencia, o al menos falta, de una aplicación sistemática de modelos simplificados con capacidad para predecir dominios paramétricos (ventanas de trabajo) de una forma

sencilla y directa que permita a los diseñadores del proceso su aplicación fiable en el mismo.

El principal objetivo de este artículo es describir una metodología, junto con su aplicación a diversos casos representativos, enfocada a la obtención de ventanas paramétricas en la aplicación de láseres de potencia a procesos de temple de aceros considerando las propiedades térmicas del material, sus propiedades de interacción con la radiación láser y la geometría característica del haz, de tal forma que la misma pueda ser utilizada directamente por los aplicadores de la tecnología. De forma complementaria, y al objeto de facilitar la comprensión del proceso de temple y su interpretación en función de las propiedades del material tratado, se analizan los correspondientes diagramas normalizados de proceso, proporcionando una guía adicional para el diseño final del mismo. Para todo ello se parte de los modelos simplificados del proceso de temple elaborados por Ashby y Easterling [1], y Miyamoto y Maruo [9]. Estos autores proporcionan expresiones para el campo de temperaturas y la profundidad templada durante el proceso. En las propias referencias donde se presentan los modelos, así como en [7] y [11], se indica la posibilidad de usar las relaciones para obtener diagramas de proceso y característicos. No obstante, en ningún caso se llega a desarrollar una metodología completa dotada de la versatilidad y el alcance de la desarrollada en el presente trabajo, con capacidad para su aplicación práctica y realista en entornos de fabricación.

Mediante el uso de la metodología introducida es posible realizar una primera estimación justificada de los parámetros del proceso. Las principales variables utilizadas son potencia del láser, velocidad de proceso, temperatura superficial, espesor templado y tamaño del haz. La representación gráfica de las relaciones entre todas, y algunas otras provenientes de ellas, proporciona no solo una herramienta para relacionar valores específicos de las variables, sino también, e incluso más importante, una representación de tendencias y comportamientos que permite entender la física implicada en el proceso.

La siguiente sección hace un breve repaso del concepto de diagrama de proceso láser como herramienta útil para estimar los parámetros de proceso más adecuados e introduce los modelos de proceso simplificados, que serán enfocados a la obtención de diagramas característicos. Tras presentar las principales relaciones de los modelos, éstas se utilizarán para obtener diferentes diagramas característicos con un material concreto, los cuales mostrarán el amplio potencial de la metodología desarrollada. Finalmente, se presentan algunas condiciones específicas de proceso, y serán calculadas sus correspondientes ventanas de trabajo haciendo uso de los diagramas previamente obtenidos.

2. PROCEDIMIENTO Y MATERIAL

En primer lugar se realizará una breve introducción al concepto de diagrama de proceso láser. Su importancia estriba en su aplicabilidad práctica para la estimación de parámetros de proceso de forma sencilla. Después se presentarán, por un lado, el modelo de Ashby y Easterling [1], y por otro, el de Miyamoto y Maruo [9]. Estos modelos proporcionan soluciones simplificadas para el campo de temperaturas de proceso

en la pieza de trabajo. Mientras que el primero es válido para haces gaussianos (Fig. 2 dcha.), el segundo trabaja con distribuciones de energía rectangular y rectangular-gaussiana (Fig. 3 izqda. y dcha. respectivamente). La manipulación de las variables y relaciones establecidas por estos modelos da lugar a la metodología práctica propuesta en el presente trabajo. Finalmente se introducirá el material considerado para la obtención de resultados prácticos.

2.1. DIAGRAMAS DE PROCESO LÁSER

El enfoque gráfico se aplica para la interacción de un haz láser con distintos materiales mediante la identificación de las principales variables y mecanismos de proceso. Una extensa descripción de los diagramas de procesos láser puede encontrarse en [7]. En este apartado se introducen los diagramas adimensionales cuya principal ventaja es que permiten mostrar las relaciones entre las variables sin tener en cuenta las propiedades del material, proporcionando, como consecuencia, una amplia perspectiva del proceso.

Considérese un haz gaussiano estacionario calentando sin fundir la superficie de un gran bloque de material. Tras un transitorio inicial, el flujo de calor alcanza el régimen permanente y el campo de temperaturas alrededor del haz alcanza un valor constante. De acuerdo con [11], el siguiente grupo de variables adimensionales (denotadas por el símbolo *) puede definirse con interés práctico:

a) Incremento de temperatura adimensional:

$$T^* = \frac{(T - T_0)}{(A_1 - T_0)} \quad (1)$$

b) Potencia adimensional del haz:

$$Q^* = \frac{AQ}{r_B \kappa (A_1 - T_0)} \quad (2)$$

c) Velocidad adimensional del haz:

$$v^* = \frac{r_B v}{\chi} \quad (3)$$

d) Tiempo adimensional:

$$t^* = \frac{t}{t_0} \quad (4)$$

e) Coordenadas x^* , y^* , z^* adimensionales:

$$(x^*, y^*, z^*) = (x/r_B, y/r_B, z/r_B) \quad (5)$$

Esta filosofía de trabajo permite ampliar el ámbito de aplicación del modelado para tener en cuenta una amplia variedad de materiales. La Fig. 1 muestra un ejemplo de diagrama adimensional que clasifica diferentes procesos láser.

2.2. MODELO DE ASHBY Y EASTERLING

Esta sección introduce el modelo de Ashby y Easterling ([1]), que proporciona una solución simplificada para el cam-

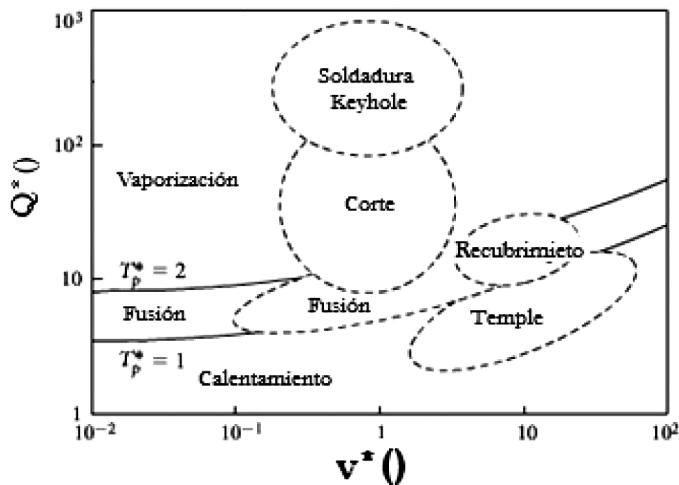


Figura 1: Diagrama de proceso láser normalizado basado en un modelo que muestra contornos para el inicio de fusión y vaporización de la superficie construido a partir de un modelo de flujo de calor de superficie (líneas continuas); para metales, cerámicas, vidrios y polímeros. Las regiones delimitadas por líneas de trazos recogen datos experimentales. Adaptado de [7]

po de temperaturas y la profundidad templada en piezas tratadas mediante una distribución transversal de intensidad gaussiana (Fig. 2 izqda.). Este trabajo utiliza las relaciones entre variables de proceso proporcionadas por el modelo de manera innovadora para obtener diagramas característicos (adimensionales y no).

En general, la profundidad de temple depende de dos conjuntos de variables. En primer lugar, las propiedades del acero: temperaturas de transformación, conductividad térmica, calor específico, absorción, etc. En segundo lugar, las propiedades asociadas al rendimiento del láser: potencia, tamaño de haz, velocidad de proceso y distribución de energía. Teniendo en cuenta todas ellas, el modelo considera la llamada ecuación del campo de temperaturas.

Los valores críticos de diferentes parámetros adimensionales se identifican para predecir las condiciones correspondientes al temple, y controlar el inicio de la fusión superficial.

Se parte de las siguientes hipótesis:

- La absorción superficial, A , es constante.
- El calor latente de la transformación de ferrita-austenita es despreciable.
- La conductividad térmica, la difusividad y el calor específico son constantes.
- La temperatura eutectoide A_1 viene dada por el diagrama de fases.
- La superficie de trabajo es plana.

El sistema de coordenadas tiene su origen en el centro del haz, con radio, r_B . El láser, de potencia total, Q , se mueve en la dirección x con velocidad v , con el eje y transversal, siendo el eje z la distancia bajo la superficie. El tiempo de interacción se define como, $t_{int} = 2r_B/v$. La Fig. 2 muestra esquemáticamente el proceso.

Bajo estas condiciones la solución general para el campo de temperaturas es:

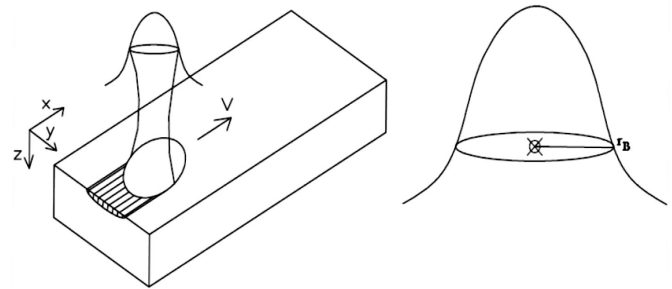


Figura 2: Haz láser recorriendo la superficie del material con velocidad v según la dirección x (izqda.) y detalle de distribución transversal de intensidad gaussiana (dcha.)

$$T(0, y, z, t) = T_0 + \frac{AQ}{2\sqrt{\pi}\kappa[t \cdot (t+1)]^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{4\chi}\left[\frac{(z+z_0)^2}{t} + \frac{y^2}{t+t_0}\right]\right\} \quad (6)$$

En la ecuación [6] aparecen algunos parámetros importantes. El primero, t_0 , es un tiempo de transferencia de calor característico, definido como, $t_0 = r_B^2/4\chi$. El segundo, z_0 es una longitud característica cuya función es limitar la temperatura en superficie a un valor finito. Para ello, la superficie real, se considera una distancia z_0 bajo la superficie del modelo (para una comprensión detallada de la importancia de z_0 véase [1]).

La distancia z_0 puede ser también adimensionalizada, $z_0^* = z_0/r_B$. Con variables adimensionales la ecuación [6] queda:

$$T^*(0, y, z, t) = \frac{(2/\pi)(Q^*/v^*)}{[t^*(t^*+1)]^{1/2}} \exp\left\{-\left[\frac{(z^*+z_0^*)^2}{t^*} + \frac{y^{*2}}{t^*+1}\right]\right\} \quad (7)$$

El tiempo, t_p^* , necesario para alcanzar la temperatura de pico, que es la temperatura máxima transmitida por el haz láser en una posición dada (x^* , y^*), se obtiene diferenciando la ecuación del campo de temperaturas con respecto al tiempo. La profundidad máxima templada así como el posible origen de la fusión ocurren en la posición central, esto es, $y^* = 0$:

$$t_p^* = \frac{1}{4} [2(z^*+z_0^*)^2 - 1 + [4(z^*+z_0^*)^4 + 12(z^*+z_0^*)^2 + 1]^{1/2}] \quad (8)$$

Usando variables dimensionales (ecuaciones [1]-[5]), la expresión para el tiempo que da lugar a la temperatura de pico queda:

$$t_p = \frac{1}{4} t_0 \left[\frac{2(z+z_0)^2}{r_B^2} - 1 + \left[\frac{4(z+z_0)^4}{r_B^4} + \frac{12(z+z_0)^2}{r_B^2} + 1 \right]^{1/2} \right] \quad (9)$$

La importancia de usar la temperatura de pico radica en que ésta determina la profundidad máxima templada, así como la posibilidad de fusión superficial. Haciendo $t^* = t_p^*$ e $y^* = 0$ en la ecuación [7], se obtiene:

$$T_p^*(0,0,z,t) = \frac{(2/\pi)(Q^*/v^*)}{[t_p^*(t_p^*+1)]^{1/2}} \exp\left\{-\left[\frac{(z^*+z_0^*)^2}{t_p^*}\right]\right\} \quad (10)$$

Despejando para la potencia adimensional:

$$Q^* = T_p^* [t_p^* (t_p^* + 1)]^{1/2} \frac{\pi}{2} v^* \exp \left\{ \left(\frac{z^* + z_0^*}{t_p^*} \right) \right\} \quad (11)$$

La ecuación [11] permite obtener diagramas que relacionan Q^* con v^* . En esa expresión el valor de t_p^* viene dado por la ecuación [8], z y v^* son variables intrínsecas del proceso y por tanto datos conocidos. Las únicas incógnitas son T_p^* y z_0^* .

Para la temperatura de pico en superficie inducida por un haz gaussiano actuando durante un tiempo igual al tiempo de interacción, Bass [2], proporciona una solución general. Los resultados son válidos para radios del haz mucho mayores que la distancia sobre la que se difunde el calor durante el tiempo de interacción. La expresión viene dada por:

$$(T_p^*)_{z=0} = \frac{1}{\pi^{3/2}} Q^* \tan^{-1} \left(\frac{8}{v^*} \right)^{1/2} \quad (12)$$

La Ecuación [12] puede igualarse con la ecuación [10], ya que en $z = 0$ ambas representan la temperatura de pico sobre la superficie:

$$\frac{(2/\pi)(Q^*/v^*)}{[t_p^* (t_p^* + 1)]^{1/2}} \exp \left\{ -\left(\frac{z_0^*}{t_p^*} \right)^2 \right\} = \frac{1}{\pi^{3/2}} Q^* \tan^{-1} \left(\frac{8}{v^*} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Usando la ecuación [13] junto con la ecuación [8] en $z = 0$, se obtiene el valor de z_0 .

$$\left\{ \begin{aligned} T_p^* &= \frac{1}{4} [2(z^* + z_0^*)^2 - 1 + [4(z^* + z_0^*)^4 + 12(z^* + z_0^*)^2 + 1]^{1/2}] \\ \frac{(2/\pi)(Q^*/v^*)}{[t_p^* (t_p^* + 1)]^{1/2}} \exp \left\{ -\left(\frac{z_0^*}{t_p^*} \right)^2 \right\} &= \frac{1}{\pi^{3/2}} Q^* \tan^{-1} \left(\frac{8}{v^*} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow z_0^* \quad (14)$$

Conociendo z_0 junto con los datos propios del proceso, todas las ecuaciones del modelo pueden ser utilizadas a fin de caracterizar los parámetros del proceso temple. Para obtener una descripción detallada del modelo ver [10].

A pesar de las ventajas de este modelo, su campo de aplicación se centra en un perfil o distribución de irradiancia gaussiana, mientras que otras distribuciones transversales de energía también son utilizadas. El siguiente capítulo introduce una breve descripción del modelo de Miyamoto y Maruo, que permite trabajar con una distribución de irradiancia rectangular y rectangular-gaussiana.

2.3. MODELO DE MIYAMOTO Y MARUO

Este apartado describe las relaciones proporcionadas por el modelo de Miyamoto y Maruo para distribuciones rectangular y rectangular-gaussiana [9]. Las hipótesis iniciales son las mismas que en el modelo de Ashby y Easterling. En estas condiciones se presentan expresiones explícitas para la irradiancia, la temperatura superficial en función de la velocidad de proceso y la profundidad templada también en función de la velocidad de proceso. Partiendo de esta situación, se propone un procedimiento útil para la obtención de ventanas de trabajo.

Considérese un perfil de irradiancia rectangular o rectangular-gaussiano como los mostrados en la Fig. 3:

La irradiancia para un rectángulo viene dada por:

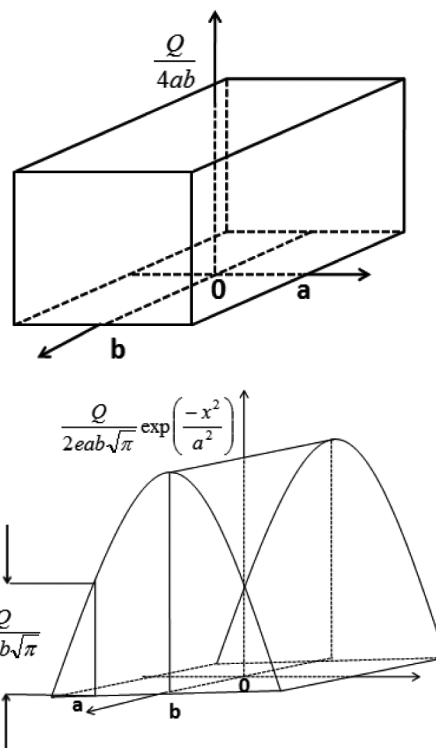


Figura 3: Distribuciones transversales de intensidad rectangular (izqda.) y rectangular-gaussiana (dcha.)

$$I_{rect} = \frac{Q}{4ab} \quad (15)$$

y, en el caso de un perfil de irradiancia rectangular-gaussiano:

$$I_{rect-g}(x) = \frac{Q}{2ab\sqrt{\pi}} \exp \left(\frac{-x^2}{r_b^2} \right) \quad (16)$$

El parámetro β se define a partir de las dimensiones a y b de la distribución:

$$\beta = \frac{a}{b} \quad (17)$$

La temperatura en función de la profundidad puede aproximarse como:

$$T_{max}(z) = \frac{\gamma A Q}{16\sqrt{\pi} \kappa b} \sqrt{\frac{2\chi}{\beta v b + 2\delta \chi}} \exp \left\{ -\left(\frac{z}{\sqrt{\beta b}} \right) \left(1 + \frac{p v b}{2\chi} \right)^{0.5} \right\} \quad (18)$$

La profundidad en la que ocurre el endurecimiento es:

$$Z_h = \frac{\sqrt{\beta b}}{\left(1 + \frac{p v b}{2\chi} \right)^{0.5}} \ln \left(\frac{\gamma A Q}{16\sqrt{\pi} \kappa b T_h} \sqrt{\frac{2\chi}{\beta v b + 2\delta \chi}} \right) \quad (19)$$

El valor de la constante δ para una distribución rectangular se obtiene mediante:

$$\begin{aligned}\beta \leq 0,25 &\Rightarrow \delta = 0,25 \\ \beta > 0,25 &\Rightarrow \delta = 3,5(\sqrt{\beta} - 0,5)^2 + 0,28\end{aligned}\quad (20)$$

y, para una fuente rectangular-gaussiana:

$$\begin{aligned}\beta \leq 0,25 &\Rightarrow \delta = 0,1 \\ \beta > 0,25 &\Rightarrow \delta = 2,7(\sqrt{\beta} - 0,5)^2 + 0,12\end{aligned}\quad (21)$$

Los valores de las constantes γ y p en las ecuaciones [20] y [21] son: $\gamma=8,1$; $p=0,7$ para una fuente rectangular y, $\gamma=7,1$; $p=0,65$ para una fuente rectangular-gaussiana.

Una vez conocidas todas las variables en las ecuaciones [18] y [19], es posible obtener diagramas característicos que pueden utilizarse para determinar la velocidad de proceso en función de la profundidad a temprar y posteriormente comprobar si esa velocidad da lugar o no a una temperatura mayor que la temperatura de fusión del material. La sección 3 contiene ejemplos aplicando esta metodología.

2.4. MATERIAL DE TRABAJO

Como material de trabajo se ha seleccionado el acero 42CrMo4. Es un acero típicamente utilizado en maquinaria industrial, permitiendo una aplicación realista de la metodología desarrollada.

Todos los modelos usan propiedades térmicas constantes. Para este estudio, los valores adoptados son un promedio de las propiedades del acero 42CrMo4 en el intervalo 25-1500 °C. Debido a la falta de información fiable en el caso de elevadas temperaturas, los datos disponibles en prontuarios [12] han sido contrastados y completados con el procedimiento sugerido en [8] para este trabajo. Los valores térmicos adoptados son:

1. Conductividad térmica, $\kappa=30$ W/m•K.
2. Calor específico, $C_p=665$ J/kg•K.
3. Densidad, $\rho=7550$ kg/m³.
4. Difusividad térmica, $\chi=5,98 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

Se ha considerado como temperatura de temple, $T_h=900$ °C, a la cual culmina la transformación austenítica de las fases iniciales del material, conocida también como Ac_3 . Como temperatura de fusión se ha tomado, $T_m=1415$ °C.

3. RESULTADOS

La metodología propuesta en este trabajo haciendo uso de los modelos simplificados desarrollados en [1] y [9] se utiliza ahora para obtener diagramas característicos.

En general los datos de entrada serán la profundidad de tratamiento deseada y las características del proceso como la potencia del láser o el tamaño de haz, para las que se obtendrá la velocidad de proceso que verifica esas condiciones. No obstante la versatilidad de la metodología permite considerar otras posibilidades.

3.1. DIAGRAMAS USANDO EL MODELO DE ASHBY Y EASTERLING

Este apartado refleja las posibilidades disponibles utilizando la metodología desarrollada en el apartado 2.1. Se presentan relaciones entre las variables significativas del proceso en forma de diagramas característicos. A pesar de la gran cantidad de diagramas posibles, este estudio se centra en las relaciones que son más interesantes desde el punto de vista de los diseñadores del proceso.

La Fig. 4 contiene un diagrama adimensional, Q^* frente a v^* , con la condición de que la superficie alcance temperatura de temple, $T(z=0)=T_{Ac3}$, para diferentes radios de haz, $r_B=1, 2, 5, 7$, y 10 mm, que son tamaños típicos de haces en este tipo de procesos.

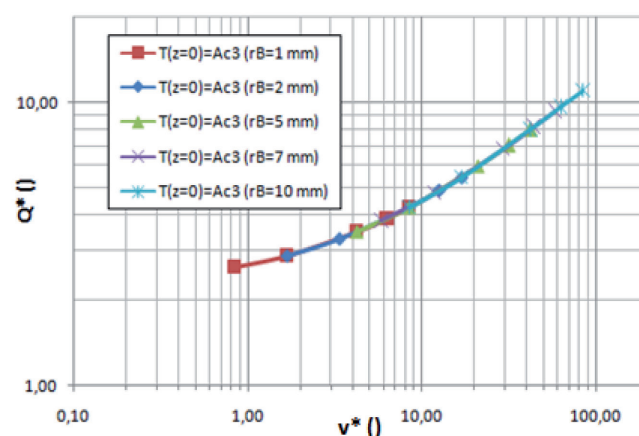


Figura 4: Potencia adimensional, Q^* vs. velocidad adimensional, v^* , para diferentes radios de haz, condicionado a alcanzar temperatura de temple en la superficie

Este diagrama muestra la dependencia entre Q^* y v^* , independientemente del material. Para cualquier tamaño de haz, cuanto más rápido es el proceso, mayor debe ser la potencia para mantener constante la temperatura superficial. De la misma manera, cuanto mayor sea el radio de haz, mayor debe ser la potencia.

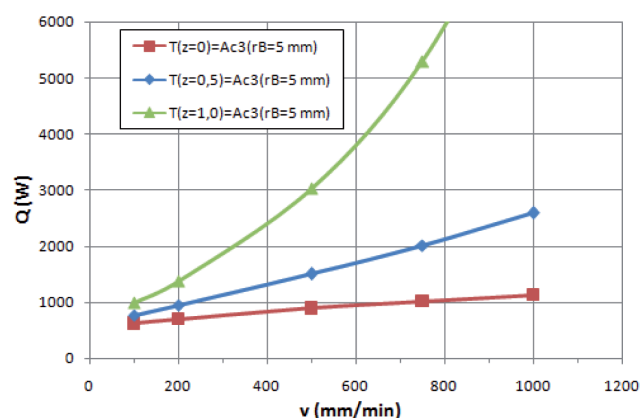


Figura 5: Potencia vs. velocidad con, $r_B=5$, para alcanzar temperatura de temple en $z=0; 0,5$ y 1 mm

Particularizando la Fig. 4 para un material determinado, se convierte en un diagrama dimensional con gran interés práctico. La Fig. 5 contiene un diagrama v frente a Q para el acero 42CrMo4 con un radio del haz, $r_B=5$ mm. Muestra las funciones correspondientes para alcanzar la temperatura de temple en $z=0$ (la superficie), $z=0,5$ y $z=1$ mm, respectivamente.

Nuevamente es fácil advertir la dependencia entre v y Q . Cuando la profundidad objetivo se incrementa, la potencia necesaria para una misma velocidad aumenta también. En los casos de $z=0$ y $0,5$ mm la relación entre potencia y velocidad se mantiene casi lineal, sin embargo, a medida que la profundidad aumenta esta relación tiende a un comportamiento exponencial, como puede comprenderse fácilmente observando la ecuación [11], donde la profundidad, z , aparece en el término exponencial.

A pesar del enorme interés práctico de la Fig. 5, ésta supone sólo una visión parcial del proceso. La combinación de potencia y velocidad para conseguir una profundidad de tratamiento determinada puede dar lugar a la fusión superficial del material. Para tener una visión más completa sobre los fenómenos involucrados, se debe considerar la fig. 6, la cual

representa un diagrama adimensional, $T^*(z=0)$ frente v^* para diferentes niveles de potencia adimensional obtenido mediante la ecuación [10].

En la Fig. 6 se muestra como, cuanto mayor es la potencia, más elevada resulta la temperatura superficial. De acuerdo con la definición de temperatura adimensional (ecuación [1]), un valor de $T^* = 1$, significa que se ha alcanzado la temperatura de temple. Por lo tanto, un valor mucho mayor que 1, para una profundidad dada, significa que la cantidad de energía introducida en la muestra daría lugar a una temperatura que supera la temperatura de temple, y que por lo tanto, podría alcanzar o incluso superar la temperatura de fusión.

Relacionando otras variables del proceso se pueden obtener diagramas más completos. La Fig.7 muestra la intensidad del haz en función del tiempo de interacción, t_{int} , con diferentes condiciones de temperatura y radios de haz, $r_B=5$ y 7 mm, para dos profundidades típicas de tratamiento, $0,5$ y 1 mm.

El diagrama puede emplearse como una herramienta de diseño por sí mismo. Para una profundidad deseada (en este caso $0,5$ ó 1 mm), las combinaciones adecuadas de I y t_{int} serán aquellas que, estando contenidas en la curva correspondiente

a la profundidad deseada, permanezcan por debajo de la curva asociada a la fusión superficial para el radio de haz utilizado.

Los diagramas mostrados anteriormente son sólo algunos casos representativos entre muchas otras posibilidades usando la metodología descrita. La decisión al respecto corresponde a los diseñadores del proceso, que conocen los objetivos y las condiciones del mismo.

3.2. DIAGRAMAS UTILIZANDO EL MODELO DE MIYAMOTO Y MARUO

Las Figuras 8 y 9 muestran dos diagramas construidos usando el modelo de Miyamoto y Maruo para una fuente rectangular (ecuaciones [18] y [19]). La Fig. 8 muestra la profundidad templada en función de la velocidad de proceso para diferentes tamaños de haz, $a=1; 2; 5; 7; 8$ mm, $b=5$ mm en todos los casos. La Fig. 9 muestra la temperatura superficial en función de la velocidad de proceso, también para diferentes tamaños de haz. En ambos casos, la potencia del láser es, $Q = 3$ kW.

Para unas características determinadas del proceso y una profundidad deseada, las figuras informan sobre la posibilidad de llevar a cabo el proceso, y si éste es posible, proporcionan el intervalo de velocidad en la que el proceso cumple las especificaciones.

Una vez establecidas la potencia, el tamaño de haz y la profundidad de tratamiento deseada (en este caso $Q=3$ kW $r_B=5$ mm y $z_h=1$ mm respecti-

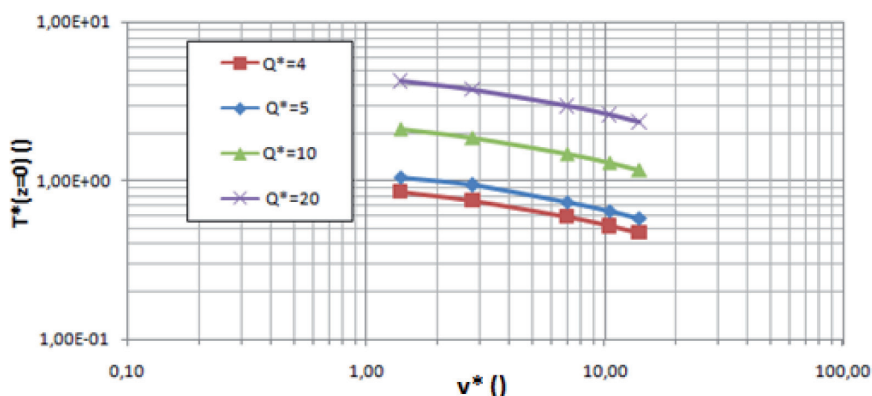


Figura 6: Temperatura adimensional en superficie $T(z=0)$, vs. velocidad adimensional, v^* , con $r_B=5$ y potencia adimensional, $Q^*=4; 5; 10$ y 20

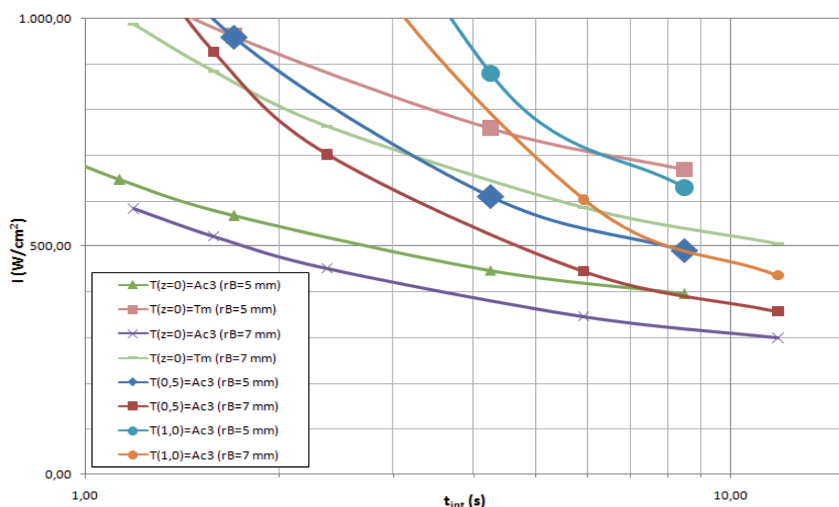


Figura 7: Intensidad vs. tiempo de interacción para varias profundidades $z_h=0; 0,5$ y 1 mm con $r_B=5$ y 7 mm

vamente), partiendo de z_h en el eje de abscisas, el valor correspondiente sobre la curva se determina como en la fig. 8. Ahora, este valor, se proyecta nuevamente sobre el eje de ordenadas, obteniéndose el valor de la velocidad. Esta es la velocidad de proceso que conduce a la profundidad deseada. Se trata de la velocidad máxima, V_{Max} , si el proceso transcurriese más rápido la profundidad sería menor. Sin embargo, puede que la velocidad obtenida llegue a producir fusión superficial.

La fig. 9 permite comprobar si un valor de velocidad produce fusión superficial. Procediendo de una manera similar, la temperatura de fusión del material debe ser proyectada desde el eje de abscisas hasta la curva correspondiente, y desde allí, al eje de ordenadas. El valor obtenido, v_{Min} , puede considerarse como la velocidad mínima. Si el proceso fuese más lento, daría lugar a la fusión de la superficie. Ahora, los valores de v_{Max} y v_{min} deben compararse. Hay dos posibilidades:

1. Si $v_{Min} > v_{Max}$ el proceso no es factible. La velocidad, v_{max} , daría lugar a la fusión del material.
2. Si $v_{Min} < v_{Max}$ el proceso es factible. La ventana de trabajo quedaría determinada entre v_{Min} y v_{Max} .

Este procedimiento proporciona una manera simple e intuitiva para obtener ventanas de trabajo. En la siguiente sección se desarrollarán ejemplos para algunas aplicaciones particulares.

3.3. OBTENCIÓN DE VENTANAS DE TRABAJO

Con el objetivo de facilitar la comprensión de los datos proporcionados por las figuras, en este apartado se desarrollarán tres ejemplos prácticos, obteniendo ventanas de trabajo asociadas a especificaciones realistas.

- Caso 1: A partir de la Fig. 7, que representa irradiancia, I , frente a tiempo de interacción, t_{int} , para diferentes radios de haz y espesores templados, se considera el objetivo de templar una profundidad de 1 mm con un radio de haz, $r_b=5$ mm. Los puntos factibles están en la curva correspondiente a la irradiancia para $r_b=5$ mm (marcada con un círculos grandes), bajo la curva asociada a la irradiancia que conduce a la fusión superficial con el mismo radio de haz (marcada con un cuadrados grandes). En esas condiciones las variables del proceso son:

$$I < 700 \text{ W/cm}^2$$

$$t_{int} > 8 \text{ s}$$

Si el espesor de tratamiento deseado fuese 0,5 en lugar de 1 mm, entonces la curva correspondiente (marcada con rombos grandes), corta la curva de fusión en un tiempo de interacción menor. Las variables del proceso quedan:

$$I < 975 \text{ W/cm}^2$$

$$t_{int} > 0,75 \text{ s}$$

- Caso 2: Considérese un proceso que utiliza un haz rectangular y tiene las siguientes características :
 - Potencia absorbida, $Q=3$ kW
 - Objetivo de profundidad templada, $z_h=1$ mm
 - Haz rectangular, con parámetro geométrico, $a=5$ mm
 - Temperatura de temple, $T_{Ac3}=900$ °C
 - Temperatura de fusión, $T_m=1415$ °C

En la Fig. 8, desde el eje de ordenadas, el punto correspondiente a 1 mm debe proyectarse sobre la curva para $a=5$ mm (marcada con triángulos), y entonces

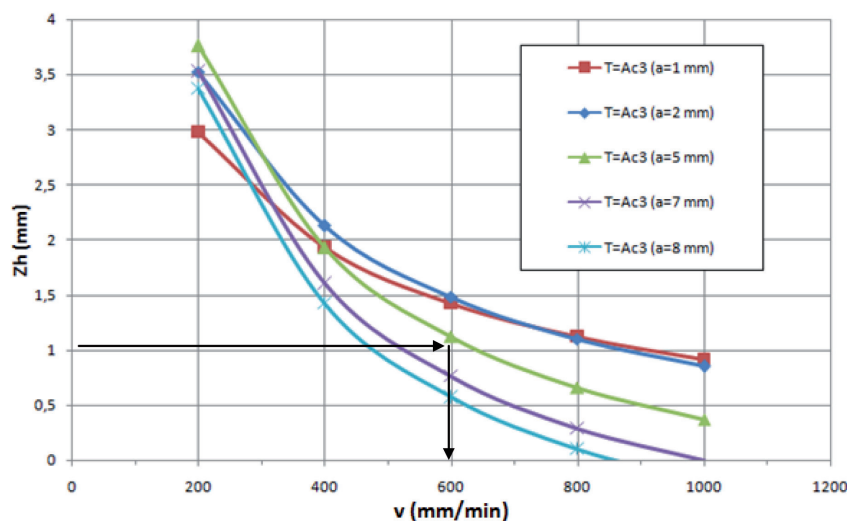


Figura 8: Espesor templado, z_h vs. velocidad, v , para diferentes tamaños de haz con una potencia de $Q=3$ kW. Las flechas ilustran el ejemplo descrito en la sección 3.3

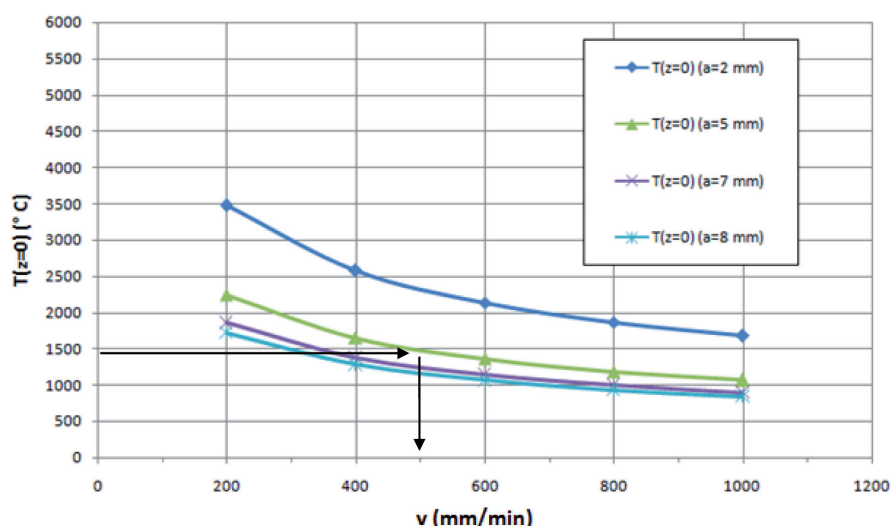


Figura 9: Temperatura superficial, $T(z=0)$ vs. velocidad, v , para diferentes tamaños de haz con una potencia de $Q=3$ kW. Las flechas ilustran el ejemplo descrito en la sección 3.3

ces, proyectar nuevamente sobre el eje de abscisas (siguiendo las flechas). El punto marcado sobre el eje es, $v_{Max}=600$ mm/min. Si la velocidad fuese mayor, la profundidad de 1 mm templado nunca podría ser alcanzada.

Considérese ahora la fig. 9, empezando desde el eje de ordenadas con la temperatura de fusión, y proyectando de nuevo sobre la curva, y desde ella sobre el eje de ordenadas, el punto obtenido ahora es, $v_{Min}=500$ mm/min. Si el proceso fuese más lento la superficie se fundiría.

Puesto que $v_{Max}=600 > v_{Min}=500$ (mm/min), el proceso es factible y la ventana de trabajo queda:

$$500 < v < 600 \text{ (mm/min)}$$

• Caso 3: Igual que el caso 2 pero buscando templar 1,5 mm. Procediendo de forma similar que en el caso 2 la ventana de trabajo queda:

$$500 < v < 525 \text{ (mm/min)}$$

4. DISCUSIÓN

Los diagramas calculados han demostrado la viabilidad de la metodología presentada para relacionar variables y tendencias específicas. La fig. 4 muestra la relación entre la potencia y la velocidad de proceso para mantener constante un valor determinado de la temperatura independientemente del material utilizado. Analizando esta figura se entiende fácilmente que, tratar de mejorar la productividad de un determinado proceso, a base de incrementar la velocidad del mismo, tiene ciertas limitaciones. La figura muestra cómo a mayor velocidad, mayor debe ser la potencia del láser, más que proporcionalmente. La fig. 5 es una particularización de la anterior para un material típicamente utilizado. Esta figura permite observar que para conseguir 1 mm de profundidad templada, la potencia del láser necesaria aumenta rápidamente con la velocidad. Por ejemplo, para una velocidad de proceso de 750 mm/min, la potencia necesaria sería de unos 6.000 W.

La fig. 6 presenta el problema desde un punto de vista complementario. Algunas limitaciones del proceso de temple no provienen solo de la necesidad de una elevada potencia, sino también de la necesidad de evitar la fusión superficial. Es esencial controlar el efecto que una combinación determinada de velocidad y potencia tiene sobre la temperatura en la superficie. Esta representación adimensional proporciona una visión completa sobre el comportamiento de la temperatura, independientemente del material utilizado. Velocidad y potencia muestran diferentes efectos sobre la temperatura. Mientras que la velocidad creciente conduce a una temperatura de la superficie inferior, el aumento de la potencia tiene el efecto inverso. Para una aplicación particular, cada combinación posible de potencia y velocidad deberá comprobarse mediante un diagrama como este.

La fig. 7 introduce el uso de dos variables obtenidas como una combinación de las básicas: tiempo de interacción, que es el resultado de dividir el diámetro del haz por la velocidad de proceso, y la irradiancia que es la potencia dividida por el área efectiva del haz. En la misma figura se representan la irradian-

cia que produce fusión superficial y profundidades templadas de 0,5 y 1 mm, en función de la velocidad. Esta figura muestra la influencia de la profundidad deseada sobre la amplitud de las ventanas de trabajo. Como se muestra en la subsección anterior, el incremento de 0,5 a 1 mm de profundidad templada conduce a un tiempo de interacción más de diez veces mayor (de 0,75 a 8 s), que, de acuerdo con la definición del tiempo de interacción, significa que el proceso debe transcurrir diez veces más lento. Sólo mediante el uso de un diagrama como éste es posible obtener de forma sintética información tan relevante.

Los diagramas proporcionados por el modelo de Miyamoto y Maruo muestran tendencias y comportamientos en el caso de un haz rectangular. Mediante el uso de diagramas como los mostrados en las figuras 8 y 9 las ventanas de trabajo pueden obtenerse de forma sencilla. Una vez más la influencia de la profundidad templada tiene una enorme repercusión sobre el tamaño de las ventanas de trabajo. Mientras que para una profundidad de 1 mm, su amplitud es de aproximadamente 100 mm/min (de 500 a 600 mm/min), en el caso de 1,5 mm el tamaño de la ventana se reduce a sólo 25 mm/min (de 500 a 525 mm/min).

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología de tipo clásico y basada en modelos analíticos simplificados para obtener diagramas característicos y ventanas de trabajo en el proceso de temple superficial de aceros con láser. Las principales conclusiones son las siguientes:

1. Se han introducido un amplio conjunto de parámetros de proceso adimensionales, de gran importancia puesta de manifiesto para una mejor comprensión de la física involucrada en el proceso de temple mediante láser.
2. Se han presentado los modelos de Ashby y Easterling y de Miyamoto y Maruo, indicando las principales relaciones entre variables del proceso de temple mediante láser, y sus limitaciones prácticas.
3. Las relaciones procedentes de los modelos simplificados han sido utilizadas para definir un procedimiento que permite obtener diagramas característicos y ventanas de trabajo. Este procedimiento permite obtener, de forma rápida y sencilla, información de gran interés práctico durante el diseño del proceso de temple con láser.
4. Se han obtenido y analizado diagramas característicos para un material particular.
5. Los resultados obtenidos han sido sometidos a un proceso de discusión que ha puesto de manifiesto su utilidad durante la primera etapa de diseño del proceso.
6. A pesar de su aparente sencillez y carácter simplificado, la metodología planteada permite un primer establecimiento de ventanas perimétricas de trabajo, en función principalmente de las propiedades térmicas del material, en las que pueden quedar excluidas determinadas opciones consideradas "a priori" como deseables.
7. Respecto a este último punto, los resultados obtenidos vienen claramente influenciados por una correcta especificación de las propiedades termo-físicas de los ma-

teriales, en ese sentido, las predicciones son altamente sensibles y deben basarse sobre datos contrastados experimentalmente. Pero, al mismo tiempo, la propia capacidad de la metodología para obtener resultados a partir de la introducción de dichos valores, permite un análisis adicional de márgenes de trabajo en función de la posible variabilidad de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación que sirve de base al presente artículo se ha desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación LEIA, financiado por el CDTI (Proyecto IDI-20111198).

LISTA DE SÍMBOLOS

A	[]	Coefficiente de absorción para la radiación láser
A ₁	[K]	Temperatura eutectoide
C _p	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Calor específico
I	[W/m ²]	Irradiancia de la fuente láser
Q	[W]	Potencia neta del láser
r _B	[m]	Radio del haz láser
T	[K]	Temperatura
t	[s]	Tiempo
T ₀	[K]	Temperatura inicial
t ₀	[s]	Tiempo de transferencia de calor característico
t _{int}	[s]	Tiempo de interacción
T _h	[K]	Temperatura de temple
T _m	[K]	Temperatura de fusión
T _p	[K]	Temperatura de pico
t _p	[s]	Tiempo hasta alcanzar la temperatura de pico
v	[m/s]	Velocidad de traslación del láser
x	[m]	Coordenada x
y	[m]	Coordenada y
z	[m]	Coordenada z
z ₀	[m]	Longitud característica
Z _h	[m]	Espesor templado
κ	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Conductividad térmica
ρ	[kgm ⁻³]	Densidad
χ	[m ² s ⁻¹]	Difusividad térmica

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ashby M F, Easterling K E. "The transformation hardening of steel surfaces by laser beams – I. Hypo-Eutectoid steels", *Acta Metall.* April 1984. Vol. 32, P. 1935-1948. ([http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(84\)90175-5](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(84)90175-5))

- [2] Bass M, Bertolotti M. *Physical Processes in Laser-Materials interaction*. New York: Plenum Press, 1983
- [3] Carslaw H S, Jeager J C. *Conduction of Heat in solids*. Oxford: Clarendon Press, 1959. 520 P.
- [4] García-Beltrán A, Ocaña J L. "Modelo numérico tridimensional para la simulación de procesos de tratamiento superficial de materiales con láser", *Revista de metalurgia*. 1998. Vol. 35, P. 75-83. (<http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1999.v35.i2.609>)
- [5] García-Beltrán A, Marín L F, Ocaña J L. "Análisis de la influencia del factor de solapamiento en el tratamiento térmico de superficies extensas de aceros por láser", *Revista de Metalurgia*. 1996. Vol. 43-4, P. 284-293. (<http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.2007.v43.i4.74>)
- [6] García-Beltrán A, Ocaña J L, Molpeceres C L "TEMPLUM: A process adapted numerical simulation code for the 3D predictive assessment of laser surface heat treatments in planar geometry", *Wseas transactions on computers*. 2008. Vol. 7, P. 65-74
- [7] Ion J C. *Laser processing of engineering materials. Principles, procedure and industrial application*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 576 P.
- [8] Miettinen J. "Calculation of Solidification-Related Thermophysical Properties for Steels", *Metallurgical and materials transactions B*. April 1997. Vol 28-B, p. 281-297. (<http://dx.doi.org/10.1007/s11663-997-0095-2>)
- [9] Miyamoto I, Maruo H. "Transformation Hardening by linear-polarized laser beam – Development a novel laser beam shaping optics and its applications to materials processing (Report 2)", *Welding International*, 1995. Vol. 9-2, p. 108-115. (<http://dx.doi.org/10.1080/09507119509548764>)
- [10] Pan J, Gür C. *Handbook of Thermal Process Modeling of Steels*. Florida: CRC Press, 2009, p. 500-626
- [11] Shercliff H R, Ashby M F. "The prediction of Case Depth in Laser Transformation Hardening", *Metallurgical Transactions A*. 1991. Vol 22-A, P. 2459-2466. (doi:10.1007/BF02665012)
- [12] Totten G E. *Steel heat treatment handbook*. Florida: CRC Press 2006
- [13] Yung C S, Wenda T, Bailey N S. "Predictive modeling and experimental results for residual stresses in laser hardening of AISI 4140 steel by a high power diode laser" *Surface & Coatings Technology*. 2009. Vol. 203, P.2003-2012. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.039>)