

Procedimiento para la adecuada selección de aceros y de su tecnología de tratamiento térmico

Procedure for the appropriate selection of steels and of their technology of heat treatment

Dr.C. Francisco Martínez-Pérez

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE), Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN. La selección adecuada y la correcta aplicación de la tecnología del tratamiento térmico para la fabricación de un elemento de máquina necesita de procedimientos y conocimientos que hoy, se hacen mucho más complejos. No solo es indispensable conocer previamente de las condiciones de trabajo exigidas de temperatura, medio ambiente, resistencias de diferente índole (a tracción, flexión, torsión, fatiga) sino que en ocasiones se necesitan diferenciar las propiedades del núcleo de las de la superficie, lo que exige del conocimiento de una nueva ciencia, “la ingeniería de superficies”. En el presente trabajo en forma de razonamientos algorítmicos y aplicando aspectos novedosos, algunos desarrollados por el autor, se pretenden facilitar los elementos esenciales para lograr una aplicación exitosa que garanticen las exigencias de trabajo del elemento.

Palabras clave: producción de elementos de máquina, ingeniería de superficies, algoritmización.

ABSTRACT. Proper selection and proper application of heat treatment technology for the manufacture of a machine element need adequate procedures and knowledge that today become much more complex. Not only is essential prior knowledge of working conditions required temperature, environment, resistances of different types (tensile, bending, torsion, fatigue) but sometimes it is needed to differentiate the core properties of the surface ones. That needs today requiring knowledge of a new science, “surface engineering”. In this work in the form of algorithmic thinking and applying novel aspects, some developed by the author, is intended to provide the essentials for a successful application to ensure work requirements of the element.

Keywords: Production of machine elements, surface engineering, algorithmization.

INTRODUCCIÓN

La respuesta integral que se necesita en un elemento de máquina está íntimamente relacionada no solo con la correcta selección del material a utilizar, sino con la tecnología de tratamiento térmico que debe ser aplicada. La resistencia de un elemento de máquina, en muchos casos exige de la obtención de estructuras martensíticas, siendo éstas las que brindan una mayor dureza y resistencia. A su vez, muchos elementos de máquina requieren propiedades diferentes en el núcleo que en la superficie, donde están presentes exigencias de poco desgaste. Hoy la problemática de las exigencias de una superficie necesita de la aplicación de elementos de tribología y de ingeniería de superficies.

La formación de gradientes de esfuerzo en procesos de desgaste adhesivo, implican la posibilidad de que el desgaste y la fricción se concentren solo en la capa superficial con la menor penetración posible en la misma de los esfuerzos ac-

tuantes. De no ser así, se corre el riesgo de que el desgaste se produzca desde el interior de la capa y por tanto sea mucho mayor y también el daño.

En el proceso de temple de un acero, se deben tener en cuenta su composición química, el contenido real de carbono, el medio de enfriamiento (su temperatura y agitación), las dimensiones y formas del elemento y la necesidad o no de diferenciar propiedades en el núcleo y superficiales.

En el trabajo se propone un procedimiento, utilizando varios enfoques algorítmicos, que permiten que la aplicación de todo el proceso de obtención de las propiedades integrales del elemento sean consideradas y permitan un mejor resultado. Se presentan varias tablas y figuras que permiten alcanzar estos propósitos; habiendo sido empleados en la práctica industrial con resultados satisfactorios.

DESARROLLO

No se pretende en el trabajo profundizar en la selección del acero a emplear. La existencia de diversas publicaciones y artículos referidos al tema confeccionados por Apraiz (1984); Martínez (1988); Valencia, (1988); Martínez (1990); Martínez (2000); Kudriatseva (2005); Arza (2006); Martínez (2013), hace esto innecesario. Por el contrario se profundizará en todo lo referido a la selección y correcta aplicación de la o las tecnologías de tratamiento térmico, así como en lo referido a la ingeniería de superficies en cuanto a diferenciar las propiedades de núcleo y superficie y la interrelación entre ambos (Martínez, 2014)¹.

Tratamiento volumétrico o aquel en que sea necesario diferenciar propiedades del núcleo y la superficie

El primer aspecto a tener en cuenta en la selección de la tecnología de tratamiento térmico a emplear para la completa satisfacción de las exigencias de trabajo estará destinado a conocer de la necesidad o no de diferenciar las propiedades de núcleo y superficie y el garantizar su adecuada interrelación. Hay que tener en cuenta desde un principio que a medida que se avance en este procedimiento, habrá quizás la necesidad de cambiar el acero inicialmente seleccionado. Este primer aspecto llevado a un enfoque algorítmico se podrá ver así (Figura 1).

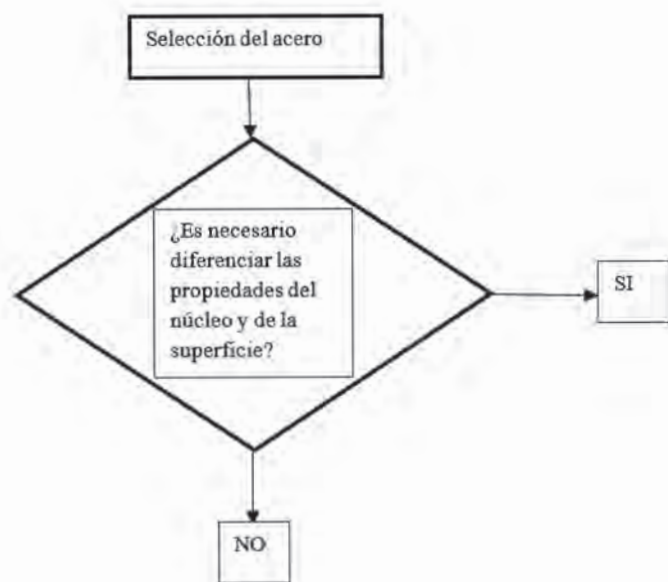


FIGURA 1. Enfoque algorítmico en el primer paso del procedimiento.

Se analiza en primer término la variante en que no se hace necesario diferenciar las propiedades del núcleo y superficie. En este caso, el procedimiento de la tecnología a emplear deberá incluir el riguroso análisis de la resistencia exigida para garantizar las condiciones de trabajo y esto incluirá las características estructurales del material. En este análisis hay que incluir:

a) ¿qué tipo de sollicitudes están actuando? (resistencia a

la tracción, a la flexión, a torsión, a la fatiga, sollicitudes combinadas, existen cargas de impacto, qué temperatura es la de trabajo, etc.).

- b) Dimensiones del elemento.
- c) Condiciones tecnológicas existentes de fabricación, número de elementos a fabricar.

Todos estos aspectos conocidos, no son parte esencial en el procedimiento que se presenta, el cual aportará un análisis que parte esencialmente de conocer qué cantidad de martensita se necesita en el núcleo y cómo esto se logra, teniendo en cuenta la forma y dimensiones de la pieza y las características del medio de temple (esto estará íntimamente relacionado con el concepto de templabilidad).

El cálculo de la templabilidad es un problema tecnológico perfectamente definido en numerosos libros de texto y otras publicaciones sobre tratamiento térmico (Martínez, 2015²; Caballero, 2012). En lo fundamental, se parte de los resultados obtenidos en un análisis en un equipamiento pare el ensayo Jominy. En este ensayo se puede establecer una relación entre la distancia al extremo templado en la probeta normalizada para el mismo y empleando los parámetros normalizados para el ensayo Jominy, conocer el diámetro máximo en el que se puede obtener un 50% de transformación martensítica en el acero en cuestión. La obtención del 50% de transformación martensítica dependerá del contenido de carbono y de la presencia de elementos aleantes. En la Tabla 1 se puede apreciar para aceros al carbono y aleados la dureza promedio posible a alcanzar en una zona con un 50% de martensita (Martínez, 2000).

TABLA 1. Dureza promedio en la zona de 50% de martensita en función del contenido de carbono y del tipo de acero

Contenido de Carbono (%)	HRC	
	Al carbono	Aleados
0,08-0,17	-	25
0,18-0,22	25	30
0,23-0,27	30	35
0,28-0,32	35	40
0,33-0,42	40	45
0,43-0,52	45	50
0,53-0,62	50	55
≥ 0,63	55	60

En la Tabla 2 se observa con mayor precisión la dureza que puede alcanzarse en función del contenido de carbono y el contenido de la transformación martensítica (Martínez, 2000).

TABLA 2. Efecto de la concentración de carbono y el porcentaje de martensita (M) en la dureza promedio del acero templado

Porcentaje Carbono, %	HRC				
	99% M	95% M	90% M	80% M	50% M
0,10	38,5	32,9	30,7	27,8	26,2
0,20	44,2	40,5	38,2	35,0	31,8
0,30	50,3	47,0	44,6	41,2	37,5

¹ MARTÍNEZ, F.: ¿Qué es la Ingeniería de Superficies? Cuál es su aplicación?, CubaMan, NT 272, CUJAE, La Habana, Cuba, marzo 2014.

² MARTÍNEZ, F.: Teoría y Práctica de la Tecnología de Tratamiento Térmico de aleaciones ferrosas, En proceso de Edición, Colombia, julio 2015.

Porcentaje Carbono,%	HRC				
	99% M	95% M	90% M	80% M	50% M
0,36	53,9	50,4	47,6	44,4	40,5
0,38	55,0	51,4	49,0	45,4	41,5
0,40	56,1	52,4	50,0	46,4	42,4
0,42	57,1	53,4	50,9	47,3	43,4
0,44	58,1	54,3	51,8	48,2	44,3
0,45	59,1	55,2	52,7	49,0	45,1
0,48	60,0	56,0	53,5	49,8	46,0
0,50	60,9	56,8	54,3	50,6	46,8
0,52	61,7	57,5	55,0	51,3	47,7
0,54	62,5	58,2	55,7	52,0	48,5

Sin embargo, si se quiere analizar la templabilidad de una pieza cualquiera, los resultados del ensayo Jominy, constituyen solo un primer paso, que además necesita de consideraciones adicionales, y que después de obtenido el resultado, se exige de la aplicación de una serie de pasos adicionales, que conforman una metodología de (Apraiz, 1984; Martínez, 2015; Caballero, 2012).

En este trabajo se pretende presentar esa metodología, mediante un algoritmo de cálculo, lo cual fue empleado exitosamente para el análisis de la templabilidad de varios elementos.

Esta metodología en forma de algoritmo se muestra en la Figura 2.

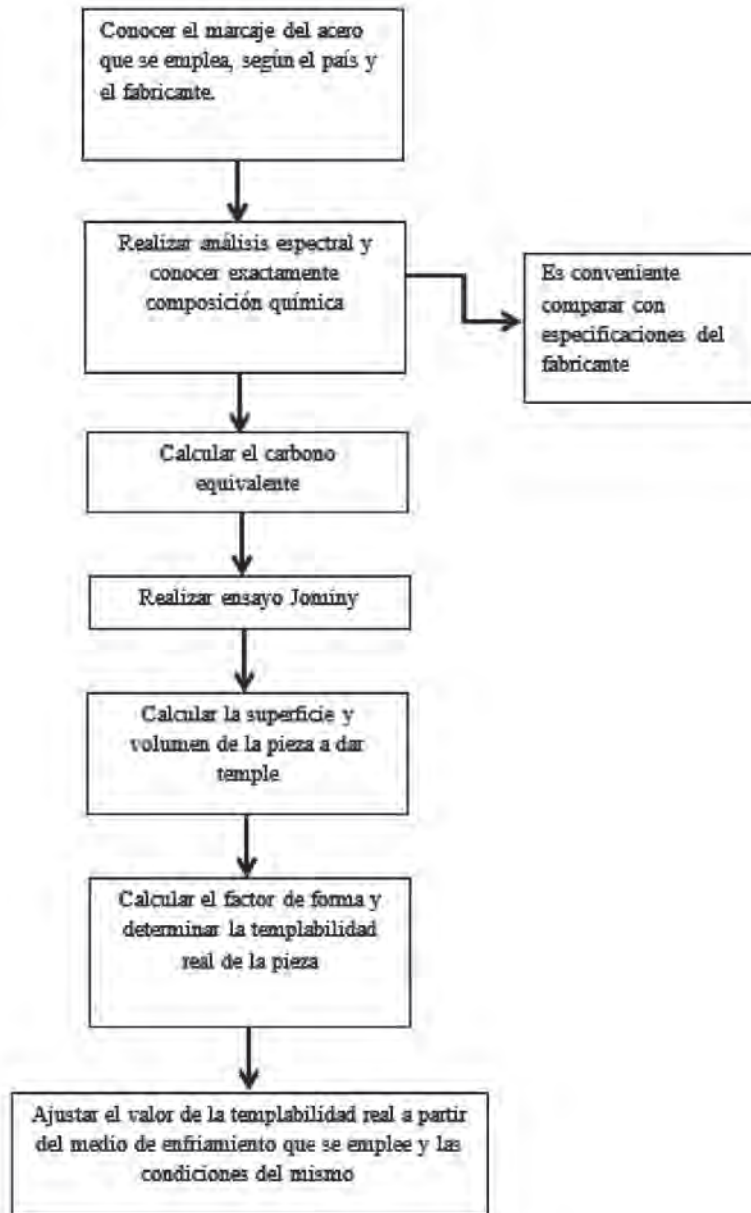


FIGURA 2. Algoritmo para el cálculo correcto de la templabilidad de una pieza.

En el ensayo Jominy, la templabilidad se halla con una relación $L/D = 3$ (como la del ensayo Jominy), en que se alcanza, con diferentes medios de enfriamiento, un temple total volumétrico (al menos 50% de martensita en el núcleo). Este diámetro se denomina diámetro ideal (D_i).

Como se comprenderá, las piezas no guardan necesariamente esta relación ($L/D = 3$). Para saber si una pieza cualquiera puede tener una templabilidad total se emplea un factor de forma K_f .

$$D_p = D_i \cdot K_f \tag{1}$$

donde:

D_p – es el diámetro o espesor medio de la pieza posible a obtener temple total.

D_i – diámetro ideal según el ensayo Jominy.

K_f – factor de forma.

A su vez, el factor de forma es igual a

$$(S/V)_p = (S/V)_j \cdot K_f \tag{2}$$

donde:

$(S/V)_p$ – es la relación superficie/volumen de la pieza real a calcular

$(S/V)_j$ – es la relación superficie/volumen de la probeta Jominy

Por otra parte, los diferentes medios de enfriamiento inciden en el valor del diámetro crítico ideal (D_i). Esto se debe a varias causas, pero en lo fundamental, a la severidad con que se transmite el calor de la pieza al medio. Los medios de enfriamiento presentan severidades de temple diferentes, no sólo entre ellos (como se puede apreciar en la Tabla 3) sino también en función de su temperatura y de la velocidad de circulación.

TABLA 3. Severidad del temple comparativa de diferentes medios de enfriamiento en función de la temperatura del medio en °C y de la velocidad de circulación del medio en m/s

Medio	Temperatura del Medio °C	Velocidad de circulación m/s	Severidad
Agua	32	0	1,1
		0,25	2,1
		0,51	2,7
		0,76	2,8
	55	0	0,2
		0,25	0,6
		0,51	1,5
		0,76	2,4
Aceite rápido	60	0	0,5
		0,25	1,0
		0,51	1,1
		0,76	1,5

De la tabla se puede apreciar que el agua tiene una severidad de temple mayor que la del aceite; y que a medida que se incrementa la velocidad de circulación se incrementa la severidad de enfriamiento, tanto en el agua como en el aceite.

Existen diferentes tipos de aceite de enfriamiento. En la Tabla 3 se compara el agua con aceites rápidos, los cuales duplican o triplican su severidad de temple en comparación con los convencionales. Además se recomienda emplear el enfriamiento en aceite, calculando éste hasta 60-70 °C (Apraiz (1984). Por otra parte, la velocidad de enfriamiento de los diferentes medios también depende del rango de temperatura en que éste se produce. Esto puede apreciarse en la Tabla 4 (Martínez. 2000). Como conclusión, los resultados del% de martensita a obtener y hasta qué profundidad se alcanza la misma no solo

dependen del acero empleado, sino del medio de enfriamiento, su temperatura, sus características de agitación y la forma y tamaño de la pieza tratada, factores todos que hay que tener en cuenta y con ellos incidir en el resultado primario.

TABLA 4. Velocidad de enfriamiento de diferentes medios en función del rango de temperaturas durante el enfriamiento

Medio de enfriamiento	Velocidad de enfriamiento en °C/s	
	Rango 650-500 °C	Rango 300-200 °C
Agua a 30 °C	500	270
Agua a 50 °C	100	270
Agua a 75 °C	30	200
Emulsión de aceite en agua	200	-
Aceite mineral promedio	100-150	20-50
Aire comprimido	30	10
Aire tranquilo	3	1

De esta forma, teniendo en cuenta todos los elementos propuestos, se podrá obtener un resultado favorable de la templabilidad exigida.

A continuación se mostrará el procedimiento de cálculo en los casos en que se necesita diferenciar las propiedades del núcleo y de la superficie.

Tratamiento en que se necesitan diferenciar las propiedades del núcleo y de la superficie (Martínez, 2014)

Los primeros aspectos a considerar en este caso serán:

- a) ¿Qué propiedades se exigen en la superficie?
- b) ¿Qué propiedades se exigen en el núcleo?
- c) ¿Qué profundidad de capa se necesita?
- d) Posible gradiente de esfuerzos que se generan en núcleo-superficie.

Los dos primeros aspectos son datos de condiciones de trabajo. Para el cálculo de la profundidad de capa en el caso de ejes sometidos a flexión puede ser llevado a cabo según el procedimiento que se muestra.

En un sistema de coordenadas a escala, se situarán en el eje Y, dimensiones en mm, colocando en primer término el radio del eje y en el eje X en MPa se irán colocando valores de diferentes esfuerzos. Este esquema se verá de la forma que se muestra en la Figura 3

En otros casos en que los esfuerzos de contacto penetran profundamente dentro del componente, hacia toda la capa superficial o aún más debajo de la misma (gradientes negativos), se necesitan de métodos que generen capas superficiales más gruesas.

Sobre la línea que demarca el extremo del radio del eje se situará el valor del esfuerzo de flexión actuante, el cual designaremos por σ_{fla} . A continuación sobre el mismo eje se situará el valor del esfuerzo de flexión del material en su capa superficial, que designaremos como σ_{flm} . Como es natural, $\sigma_{flm} > \sigma_{fla}$, lo cual, unido a la profundidad necesaria de capa a obtener, nos indicará, el valor que debe obtenerse en la capa, lo que, a su vez delimitará, como veremos más tarde el tipo de tratamiento superficial a emplear.

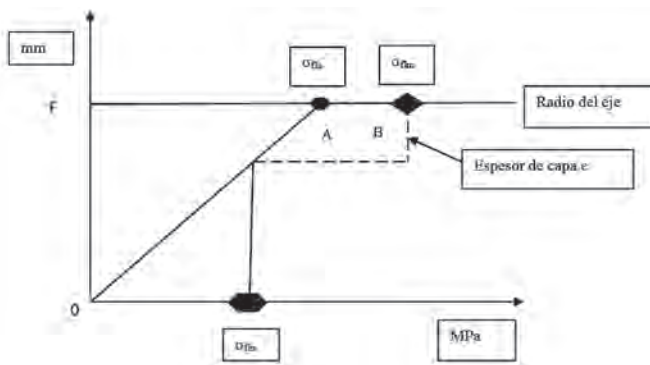


FIGURA 3. Esquema para el cálculo del espesor de capa en función de los esfuerzos de flexión actuantes.

A continuación, sobre la línea X se situará el valor del esfuerzo de flexión exigido en el núcleo del material que designaremos por σ_{fin} . Como es conocido los esfuerzos de flexión aplicados a un eje, siguen una distribución lineal desde la superficie hasta el centro, por lo que uniremos σ_{fla} con el origen de coordenadas que será el centro del eje (Figura 1). A continuación, levantando una recta desde σ_{fin} hasta el punto D, se conocerá hasta que profundidad hay que obtener la capa, para dar una respuesta integral a la solicitud de esfuerzo demandadas, este valor estará dado por $\sigma_{fin}-D$.

De esta forma podrá establecerse basado en la semejanza de triángulos una fórmula matemática para calcular el espesor de capa e.

$$\sigma_{fla} / r = \sigma_{fla} - \sigma_{fin} / e \quad (3)$$

donde:

σ_{fla} - esfuerzo de flexión aplicado.

r - radio del eje

σ_{fin} esfuerzo de flexión que soporta el núcleo.

e -espesor de capa que se desea calcular.

Por lo tanto:

$$e = (\sigma_{fla} - \sigma_{fin}) r / \sigma_{fla} \quad (4)$$

Siempre será conveniente incrementar el espesor calculado en 0,1 – 0,15 mm con la finalidad de evitar el punto crítico D.

Analicemos ahora como aspecto final, desde el punto de vista de la ingeniería de superficies qué tipo de capa deberá emplearse, lo cual podrá también establecer la necesidad de variar el acero a emplear, siempre que se garanticen en el mismo las condiciones anteriormente establecidas. Para este análisis habrá que tener en consideración el gradiente de esfuerzos que se puedan producir, lo que no está dentro de los objetivos de este trabajo.

La amplia diversidad de materiales superficiales ingenieros existentes, permiten al diseñador su selección, al menos con cierta amplitud, en vez de utilizar materiales volumétricamente iguales al de su superficie (ASM internacional, 1988; Martínez, 2012).

La Figura 4 muestra el amplio rango de combinación de profundidad de capa y de dureza que puede obtenerse en las superficies por estos métodos (Kudriatseva, 2005).

De la Figura 4, puede concluirse que diferentes métodos ofrecen diferentes posibilidades de combinación de profundidades y dureza de la capa superficial. Es de destacar que faltan algunos métodos como el níquel químico, el niquelado, el cromado el fosfatado y otros. Aquellos métodos como las

deposiciones superficiales con PVD, CVD o las implantaciones iónicas que producen solo capas muy finas y gran dureza, serán útiles su empleo, en aquellas aplicaciones con una extensión de desgaste mínima y donde el esfuerzo actuante en la superficie decrezca rápidamente, durante el trabajo, de forma tal que la delgada capa superficial no sea eliminada. Esto está asociado con que se alcance la etapa de interacción elástica rápidamente.

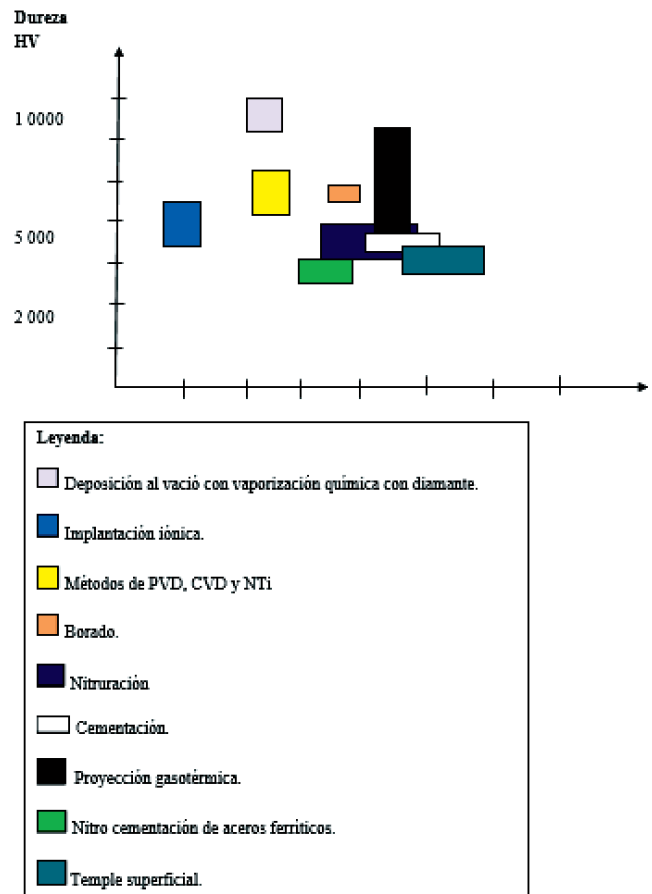


FIGURA 4. Profundidades y durezas típicas de diferentes formas de recubrimientos y endurecimientos superficiales.

CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se ha mostrado, mediante un razonamiento algorítmico y utilizando diversas tablas y figuras, algunas elaborados por el autor, un procedimiento para el cálculo más acertado de selección de tecnologías de tratamientos volumétricos de piezas de acero o de aquellas en que se necesita diferenciar las propiedades entre el núcleo y la superficie de algunos elementos de máquina de aceros. En este último se ha introducido el concepto de la ingeniería de superficie para lograr respuesta, no solo en cuanto a las exigencias de resistencia y dureza de la capa más externa del elemento, sino también en cuanto a la profundidad de la capa para evitar que las cargas actuantes provoquen daño en el núcleo del material, por un insuficiente espesor de capa. Se brindó una figura para el cálculo de la profundidad de capa en elementos sometidos a cargas de flexión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APRAIZ, B. J.: *Tratamientos Térmicos de los Aceros*, 8va. Edición, ISBN 8423705684, España, junio 1984.
- ARZA, M. B.N.: *Materiales de Construcción*, Manual, Tercera Edición, ISBN 5-217-01112-2 Moscú, Rusia, septiembre 2006.
- ASM INTERNATIONAL: *ASM Handbook*, Second Edition, ISBN 0-87170-377-7, USA, October, 1988.
- CABALLERO, N.: *Manual de Práctica de Tecnología de Tratamiento Térmico*, Ed. ISBN 978-959-261-314-0, La Habana, Cuba, enero 2012.
- KUDRIATSEVA, I. V.: *Materiales en la Construcción de Maquinarias*, Manual Tomos II y III, Tercera Edición, ISBN 621-002-33-3, Moscú, Rusia, febrero 2005.
- MARTÍNEZ, F.: *Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico*, Editorial Pueblo y Educación SNLC: CU 01.68820.3, La Habana, Cuba, 1988.
- MARTÍNEZ, F.: *Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico*, Edición ampliada, corregida, y reeditada, SNLC: RA01.13820.0, La Habana, Cuba, abril 1990.
- MARTÍNEZ, F.: “Tecnología del Tratamiento Térmico, Un enfoque sistémico”, Editorial Félix Varela, ISBN: 958-258-113-4, La Habana, Cuba, marzo 2000.
- MARTÍNEZ, F.: “Selección de materiales y tratamiento térmico para el trabajo en suelos”, *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761, 3(1): 40-44, 2013
- MARTÍNEZ, F.: “Análisis de la relación entre las propiedades de la superficie y el volumen del cuerpo desde la Ingeniería de Superficies”, *Revista Cubana de Ingeniería*, ISSN 2223-1781, 3(2): 51-57, 2012.
- VALENCIA, A.: *Tecnología de Tratamiento Térmico de los Metales*, Tercera Edición, ISBN 958-655-081-8, Colombia, 1988.

Recibido: 17/09/2015.

Aprobado: 14/03/2016

Publicado: 19/04/2016

Francisco Martínez Pérez, Prof. Titular, Investigador, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica de La Habana, Cuba, Correo electrónico: fmartinez@ceim.cujae.edu.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Programa de Investigación en Ingeniería Agrícola

Se realizan investigaciones en áreas de la Ingeniería Agrícola y Agroindustrial que plantean soluciones a problemas sectoriales o regionales de impacto nacional.

Líneas de investigación:

- Geohidrología
- Mantenimiento y reparación de la maquinaria agrícola
- Sistemas y tecnologías para la mecanización
- Ingeniería y tecnología de alimentos

Se cuenta actualmente con máquinas para la cosecha del maíz, frijol, transplantadoras de piña, reventadora de amaranto, cosechadora de jamaica, cosechadora de cacahuate, sembradoras de precisión de diferentes tipos y capacidades.

Coordinar con:

Ing. Marco A. Rojas Martínez

Director del

**Dpto. de Ing. Mecánica Agrícola
Tel.: (595) 2 1500 ext. 5719**

Dpto. de Irrigación

Tel.: (595) 2 1500 ext. 5690

**“Marcando el rumbo
de la Ingeniería
Agrícola en México,
en el Tercer Milenio”**

**Universidad
Autónoma
Chapingo**

