**SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INDUSTRIA**

**Manufactura, Soldadura y Materiales**

**Selección de aceros para la fabricación de elementos de máquinas basada en la templabilidad**

***Steel selection for the manufacture of machine elements based on the hardenability***

**Rafael Fernandez-Fuentes1, César Ariel Escalona Leyva2, Amado Cruz-Crespo3, Alejandro Duffus Scott4, Yoelmis Castellanos Cazañas5**

1- Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. [rfernandez@uclv.edu.cu](mailto:rfernandez@uclv.edu.cu)

2- Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. [cael@nauta.cu](mailto:cael@nauta.cu)

3- Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu)

4- Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. [aduffus@uclv.edu.cu](mailto:aduffus@uclv.edu.cu)

5- Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. [ycastellanos@uclv.edu.cu](mailto:ycastellanos@uclv.edu.cu)

**Resumen:**

**Problemática:** La selección de aceros para la fabricación de elementos de máquinas se basa en las propiedades mecánicas, sin embargo en muchos de estos elementos se requiere homogeneidad de las mismas en la sección. Este requerimiento sólo puede ser cumplido si se considera la templabilidad al seleccionar el acero.

**Objetivo:** Elaborar un documento que propicie la selección de aceros para la fabricación de elementos de máquinas, basada en la templabilidad.

**Resultados:** Basado en una revisión bibliográfica sobre selección de aceros basada en la templabilidad, se organizan los aspectos fundamentales en una secuencia lógica de pasos que permite la introducción de la templabilidad como elemento de juicio para la selección de aceros para la fabricación de elementos de máquinas.

**Conclusiones:** El reporte propuesto cubre recomendaciones de fácil aplicación en la selección de aceros para la fabricación elementos de máquinas, en base a la templabilidad; permitiendo determinar la composición química necesaria del acero a partir de la cual se puede elegir una marca determinada.

***Abstract:***

***Problem:*** *Steel selection for the manufacture of machine elements is based on mechanical properties. However, it´s necessary a homogeneity across the section in many of these elements. This request only can be satisfied only by considering hardenability.*

***Objective(s):*** *Elaborate a steel selection guide for the manufacture machine elements, based in the hardenability.*

***Results:*** *Based on a bibliographical revision about steels selection based on the hardenability, there are organized the fundamental aspects in a logical sequence of steps that allows the introduction of the hardenability like trial element for the selection of steels for the manufacture of machine elements.*

***Conclusions:*** The proposed report covers recommendations of easy application in the steels selection for the manufacture of machine elements, based on the hardenability; allowing determining the necessary chemical composition of the steel starting from which one can choose a certain mark.

**Palabras Clave:** Selección de aceros. Elementos de máquinas. Templabilidad

***Keywords:*** *Steel selection. Machine elements. Hardenability*

1. **Introducción**

La selección de materiales constituye una etapa fundamental en el desarrollo de un producto. En dicha etapa son muchos los factores que hay que considerar, lo cual torna complejo este proceso ya que casi todos estos factores, de una manera u otra, se relacionan entre sí.

Durante el diseño de elementos de máquinas, del tipo árboles y ejes de transmisión, se selecciona un acero y se toman sus propiedades mecánicas como punto de partida de los cálculos de resistencia. En los cálculos estáticos, ya sea para determinar el espesor o para comprobar la resistencia se utiliza el límite de fluencia o de rotura del material, y en los cálculos de fatiga se determina el coeficiente de seguridad a partir del límite de fatiga del material [1].

El valor de estas propiedades es asumido de diferentes fuentes, como por ejemplo: bases de datos, certificados de fabricantes, etc. Estas fuentes, en la mayoría de los casos, no brindan información suficiente que permita asociar las propiedades mecánicas informadas con las diversas variantes de tratamiento térmico y espesor del semiproducto [2]; por supuesto, esto trae como resultado que se limitan las posibilidades de aplicación de determinado acero.

Como consecuencia del tratamiento térmico las piezas de acero no siempre se endurecen al mismo nivel a través de toda su sección, a menos que sean piezas de muy pequeño espesor o se trate de aceros con un contenido importante de elementos de aleación. En realidad se forma un gradiente de dureza desde la superficie al centro de las piezas y además, la dureza obtenida en la superficie será distinta, según sea el espesor, siendo mayor, para un mismo acero, en el caso de que la pieza sea de menor espesor [3].

Este comportamiento, definido por la templabilidad, establece la necesidad de tenerlo en consideración para la selección del acero, sobre todo en elementos de máquinas. En este sentido el objetivo del presente trabajo es laborar una guía acerca de la selección de aceros para la fabricación de elementos de máquinas, basada en la templabilidad.

1. **Desarrollo**

La selección del acero en base a la templabilidad, para la fabricación de elementos de máquinas, busca definir una acero que por su composición química garantice la dureza requerida en la sección transversal del elemento que se fabricará; el valor de dicha dureza se refiere al valor que debe garantizarse en el centro del elemento; sin embargo, en la sección transversal del elemento se establece un gradiente de dureza, que va de un mayor valor en la superficie a otro menor en el centro.

El referido gradiente de dureza debe corresponderse con determinadas recomendaciones vinculadas a la cantidad de martensita que exista en dirección de la superficie al centro; en este sentido, se recomienda un 50 % de martensita en el núcleo, con 80 % a la mitad del radio [4]. En la superficie se obtendrá 100 % de martensita.

* 1. **Determinación de la cantidad de carbono requerida en el acero**

El primer paso consiste en relacionar la cantidad recomendada de martensita con la dureza en la sección transversal, primeramente se determina el grado de endurecimiento **S** (razón entre de la dureza de un punto en el interior del elemento **Hx** y la dureza máxima alcanzada en la superficie **Hs**) en el centro y a mitad de radio, como función de la cantidad de martensita **M** (ecuación 1 [5]). Para 50 % y 80 % de martensita se obtiene un grado de endurecimiento de 0,72 y 0,89, respectivamente, lo cual se corresponde con recomendaciones de la literatura [6].

Una vez establecidos los respectivos grados de endurecimiento se procede a determinar la dureza asociada con los mismos. Para esto se aplica la ecuación 2 [6], que establece la relación entre el grado de endurecimiento **S**, la dureza en determinado punto del interior del elemento **Hx** y la máxima dureza alcanzada en la superficie **Hs**.

**S = (M+80) / 180… (1)**

**S = Hx / Hs … (2)**

Conocido el grado de endurecimiento y sobre la base de las ecuaciones 1 y 2 se llega a las ecuaciones 3 y 4 que representan la dureza de la superficie (**Hs**) y a medio radio de distancia del centro (**Hr/2**), respectivamente, en función de la dureza del centro (**Hc**). La dureza del material, se corresponde con el mínimo valor de dureza a ser obtenido en el centro del elemento.

**Hs = 1,40\*Hc …(3)**

**Hr/2 = 1,25\* Hc …(4)**

La dureza en la superficie **Hs** resulta ser la máxima dureza posible en el acero y depende únicamente de su contenido de carbono (**C**). Esto permite establecer el primer criterio de selección del acero: su contenido de carbono (ecuación 5 [7]).

**C = ((Hs – 18,7)/60)2 …(5)**

* 1. **Determinación de la cantidad de elementos de aleación requerida en el acero**

La distribución de la dureza en el interior del elemento de máquina depende de la templabilidad del acero, la que resulta ser determinada por los elementos de aleación presentes en el mismo. Este comportamiento del acero es el que da pie al segundo criterio para su selección: cantidad de elementos de aleación que garanticen la dureza necesaria en el centro y a mitad de radio del elemento de máquina.

Para aplicar este criterio se combina la ecuación 6 (que establece la relación del diámetro del elemento **D** y la severidad de temple **I** con la distancia Jominy equivalente **Je**) con la ecuación 7 (que establece la relación entre la dureza **HRc** y la composición química, la distancia Jominy **Je** equivalente y el tamaño de grano 𝐤).

**Je =𝐃𝟏.𝟏𝟖 / 𝟖.𝟐𝟗∗𝐈𝟎.𝟒𝟒…(𝟔)**

**HRc**=𝟗𝟓√𝐂−𝟎.𝟎𝟎𝟐𝟕𝟔∗**Je2**√𝐂+𝟐𝟎𝐂𝐫+𝟑𝟖𝐌𝐨+𝟏𝟒𝐌𝐧+ 𝟓.𝟓𝐍𝐢+

𝟔.𝟏𝐒𝐢+𝟑𝟗𝐕+𝟗𝟔𝐏−𝟎.𝟖𝟏𝐤−𝟏𝟐.𝟐𝟖√𝐄+𝟎.𝟖𝟗𝟖−𝟏𝟑…(**7**)

Teniendo en cuenta la cantidad de cálculos necesarios para el desarrollo de la guía propuesta para la selección del acero para la fabricación de repuestos de árboles de transmisión, basada en la templabilidad; además de que la evaluación de cada acero disponible requiere de la repetición de estos cálculos, se ha desarrollado una herramienta computacional que permite automatizar todo el procedimiento. Esta herramienta está soportada en el programa Microsoft Excel e incluye, además, una pequeña base de datos de aceros con los valores medios de su composición química.

1. **Conclusiones**

El reporte propuesto cubre recomendaciones de fácil aplicación en la selección de aceros para la fabricación elementos de máquinas, en base a la templabilidad; permitiendo determinar la composición química necesaria del acero a partir de la cual se puede elegir una marca determinada.

1. **Bibliografía**
2. Faires, V. M., Diseño de elementos de máquinas, Editorial Cimusa, Mexico, 1996, 783 pp.
3. Carrera V, Carmenate V, Hernández F. Elementos para la selección de aceros que necesitan temple y revenido Ingeniería Mecánica, 1 (1999) 75-81
4. Martínez F. Procedure on the Selection of Steels and their Heat Treatment Technology. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 29. No.1, pp. 94-102, 2020.
5. Calvo R. El acero su elección y selección. Ed. INTA, 1956.
6. Filetin T, Liscic B, Galinec J. New computer aided method for steel selection based on hardenability. Heat treatment of metals. No. 3, 1996.
7. Totten G. Metallurgy and technologies. Steel heat treatment handbook. 2007.
8. Properties and selection: irons, steels and high performance alloys. ASM annual handbook. ASM. 2018, 2521 p.