

## V SIMPOSIO DE MATERIALES

### LA CENTRIFUGACION. UN NUEVO MÉTODO DE ENFRIAMIENTO PARA LOS ACEROS DE ALTA TEMPLABILIDAD.

#### *THE CENTRIFUGATION. A NEW METHOD OF QUENCHING FOR HIGH HARDENABILITY STEELS.*

Gilberto Israel Gurri Villafruela<sup>1</sup>, Asdrúbal García Domínguez<sup>2</sup>, Roberto Pérez  
Rodríguez<sup>3</sup>, Ana María Quesada Estrada<sup>4</sup>

1- Gilberto Israel Gurri Villafruela. Universidad de Holguín, Cuba. E-mail: [gurri@uho.edu.cu](mailto:gurri@uho.edu.cu)

2-Asdrúbal García Domínguez. Universidad de Camagüey, Cuba. E-mail:  
[asdrubal.garcia@reduc.edu.cu](mailto:asdrubal.garcia@reduc.edu.cu)

3- Roberto Pérez Rodríguez. Universidad de Holguín, Cuba. E-mail: [roberto.perez@uho.edu.cu](mailto:roberto.perez@uho.edu.cu)

4- Ana María Quesada Estrada. Universidad de Holguín, Cuba. E-mail: [aguesada@uho.edu.cu](mailto:aguesada@uho.edu.cu)

**Resumen:** Los aceros de alta templabilidad son muy utilizados en la actualidad para los procesos de conformación en frío. El alto contenido de cromo conjuntamente con otros elementos aleantes en estos aceros hace posible que durante el tratamiento térmico se obtengan propiedades físico – mecánicas variadas, lo que se encuentra relacionado con las temperaturas de austenización, los medios y métodos de enfriamiento y finalmente con las temperaturas de revenido. El acero AISI D2, es uno de los más utilizados para estos fines y su forma de enfriamiento hasta hoy día continua siendo uno de los temas más polémicos, el enfriamiento al aire, en aceite, en sales fundidas, criogénico y la aplicación de otros métodos especializados ejercen influencias diversas sobre la cinética de las transformaciones de fase, las que finalmente son las que definen la calidad y las propiedades de las piezas tratadas. En el presente trabajo se propone un nuevo método de enfriamiento para este acero por medio de la centrifugación, el cual proporciona las propiedades y características necesarias para las herramientas tratadas, constituye un método menos contaminante del medio ambiente, menos costoso y facilita la operatividad tecnológica durante los tratamientos térmicos.

X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA “COMEC  
2019”

**Palabras Clave:** Tratamiento térmico; Temple por centrifugación; Transformaciones de fase; Velocidad de enfriamiento; Contaminación.

***Abstract:** Today, high hardenability steels are widely used for cold forming processes. The high chromium content together with other alloying elements in these steels, that it makes it possible to obtain varied physical and mechanical properties during the heat treatment, which is related with the austenitization temperatures, medium and methods of quenching, and finally with the tempering temperatures. The AISI D2 steel, is one of the most used for these purposes and its form of quenching to this day continues to be one of the most controversial issues, the air, oil, molten salt, cryogenic quenching and the application of the other specials methods of quenching, exert diverse influences on the phase transformations kinetics, of which finally define the quality and properties of the treated pieces. In the present work a new method of cooling for this steel is proposed by means of centrifugation, which provides the properties and characteristics necessary for the treated tools, constitutes a less polluting method, less expensive and facilitates the technological operability during the thermal treatments processes.*

***Keywords:** Heat treatment, Centrifugation quenching, Phase transformations, Cooling rate, pollution.*

## **1. Introducción**

En la industria moderna cada vez se les presta mayor interés a los procesos de manufactura y especial importancia a las tecnologías de conformación en frío de los metales debido a sus altos niveles de complejidad y precisión, lo que hace que estos procesos sean muy costosos. Esto requiere de una cuidadosa selección de los aceros que se emplean para la fabricación de las herramientas, las cuales deben poseer altas propiedades físico - mecánicas y tecnológicas durante el proceso de explotación.

Durante la operación de conformado se desarrollan varios mecanismos destructivos los cuales actúan de forma simultánea, entre los que se encuentran: el desgaste, el micro astillado, el agrietamiento, así como la fluctuación de las cargas, las que pueden provocar las roturas de

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
"II CCI UCLV 2019"

X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERIA MECANICA "COMEC  
2019"



los punzones y matrices que conforman los troqueles. Los materiales que se utilizan para el estampado en frío están sometidos a cargas extremadamente altas, las cuales se aplican de forma muy rápida, por lo que estos materiales deben resistir cargas cíclicas sin quebrarse y sin experimentar deformación o desgaste excesivo, (Saha S.K., 2012).

Entre los aceros más utilizados para la conformación en frío se encuentran los aceros de la serie "D" los cuales se caracterizan por tener entre sus elementos altos contenidos de carbono y cromo, una resistencia media a la descarburación, una alta templabilidad, alta estabilidad dimensional, alta resistencia al agrietamiento durante el tratamiento térmico, altos niveles de dureza (54 - 61) HRC después del revenido en rangos normales de temperatura y una muy alta resistencia al desgaste, (ASM, Metals Handbook, 1991).

Una de las vías mediante la cual se logran satisfacer estas elevadas exigencias es a través de la aplicación de los tratamientos térmicos, los cuales tienen como objetivo dotar a los materiales de mejores propiedades tanto físicas como estructurales para cada una de sus aplicaciones específicas (Canale & Totten, 2005) y perfeccionando y desarrollando nuevos procedimientos que garanticen desde el punto de vista tecnológico, económico y ecológico transformaciones en los procesos convencionales dentro de la práctica industrial.

En los tratamientos térmicos una de las tecnologías más complejas es la de los aceros para herramientas y de estas la de los aceros para el conformado en frío, cuyas exigencias han conllevado a manejar de forma muy especial el proceso de enfriamiento (temple), operación la cual sigue siendo hasta hoy el "Agujero negro" dentro de la teoría y práctica de los tratamientos térmicos y donde aún existen las posibilidades reales de incidir sobre las transformaciones de fase y estructurales, sobre la calidad y las propiedades finales de las piezas tratadas, (Canale & Totten, 2005).

En la actualidad en Cuba y a nivel mundial alrededor del 70 % de las herramientas para el conformado en frío se fabrican de acero de alta templabilidad D2 y que en dependencia de la tecnología de tratamiento térmico aplicada, este puede alcanzar altos niveles de dureza y una moderada tenacidad (resistencia al choque) lo que permite conseguir indistintamente excelentes propiedades físico-mecánicas, de durabilidad y características mecánicas. De aquí que este acero sea muy utilizado en las operaciones de estampado y conformado para la fabricación de punzones y matrices destinados al corte, doblado, laminado, recortado,

## II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

### X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERIA MECÁNICA “COMEC 2019”



embutido profundo, trefilado, rebabado, roscado, moleteado, troquelado, matrices para moldeo, martillos de trituración, instrumentos de calibración y otros accesorios, entre otras múltiples aplicaciones, (Bohler-Uddeholm, 2013), (Crucible Materials Corporation).

El acero AISI D2 se ha sometido a varios procesos tecnológicos de tratamientos térmicos, convencionales y especializados y ha sido tratado además en varios medios de enfriamientos, entre los que se encuentran: el aire, chorro de aire, varios tipos de aceites sintéticos, (Božidar Lišcic, 2010), (Uddeholm, 2016), baños de metales y sales fundidas, (Gurev A.M & Voroshnyn L.G., 2005); (Brison W.E., 2015); tratamientos criogénicos, (Tated & Patil, 2012), (Hadi & Mohammad, 2015); al vacío, (Wołowiec E., 2012), (Jones W.R, 1996); en campos magnéticos, (Бернштейн М.Л., 1987), (Jaramillo, 2004), (А. В. Алифанов, 2012) y eléctricos, (Sibgatulin G.G, 1982); con rayos laser, (B.A. Ahmed, 2012), (Hongtao, 2013), (Jai Hindus.S, 2014); en lecho hirviente y bajo tratamiento aerotermodinámico, (Воробьева Г.А, 2005), (ASM, Metals Handbook, 1991), (Totten GE B. C., 1993) ; pero aun así, persisten irregularidades en la obtención de una uniformidad óptima durante el enfriamiento, lo cual es esencial si se requiere minimizar la amenaza potencial del agrietamiento, las deformaciones, las tensiones residuales y la dureza en manchas, aspectos que afectan las propiedades de resistencia obtenidas como resultado de estos tratamientos. La severidad del enfriamiento es totalmente dependiente del grado de agitación del medio (Totten GE W. G., 1996). Por consiguiente, la magnitud y la turbulencia del flujo alrededor de la pieza en la zona del enfriamiento son críticamente importantes en lo relativo a la uniformidad de la transmisión de calor a lo largo de todo el proceso, algo que es muy complejo de optimizar en los tanques de enfriamiento industriales. Por consiguiente, un flujo no uniforme durante el enfriamiento contribuirá al aumento de las tensiones térmicas, el agrietamiento y las deformaciones, (Canale & Totten, 2005).

Se ha demostrado (Kobasko NI, 2003), que cuando se realiza un correcto diseño de los sistemas de bombeo o de impelentes en los tanques o depósitos para el enfriamiento pueden obtenerse velocidades muy altas de agitación en los medios de enfriamientos, lo que provee un máximo nivel de tensiones compresivas superficiales, una reducción sustancial del agrietamiento y un mejor control sobre las deformaciones. A estos procesos se les conoce como: "Procesos intensivos de temple", (Intensive quenching processes, (IQP-siglas en inglés)

## II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

### X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERIA MECANICA “COMEC 2019”



o Intensive quenching Technologies (IQT). Estos mecanismos de impulsión "violenta" pueden ser logrados también empleando ondas ultrasónicas, campos eléctricos o magnéticos, (Totten GE B. C., 1993), vibro-mescladores, (Sverdlin AV, 1997) o mediante el control continuo de la severidad y uniformidad del enfriamiento a través de la variación de la presión superficial de los aceites para temple durante el enfriamiento, (Asada & Ogino, 1996).

No obstante, a pesar de los avances tecnológicos logrados aún persisten deficiencias que se observan en las herramientas de conformar, como son las frecuentes roturas por agrietamiento, microastillado, fatiga térmica, heterogeneidad estructural y de dureza, bajas propiedades de tenacidad y otras que no dependen totalmente de los procedimientos empleados, sino que son inherentes de las propiedades físico - químicas de los medios y que inciden de forma negativa en el proceso de enfriamiento y en el medio ambiente. Las diferencias entre los medios antes mencionados no solo se limita a que estos enfrían más rápidos o más lentamente, sino también en la rapidez con que algunos absorben el calor, unos en el mismo comienzo, otros a mediados y otros al final del enfriamiento. Pero una mayor influencia sobre el carácter del enfriamiento ejerce el cambio de estado de agregación de los medios en el período de enfriamiento. Aquellos medios tales como el agua, disoluciones acuosas de diferentes compuestos, aceites y otros, ebullicen a temperaturas más bajas que las temperaturas de las piezas que en ellos se enfrían, lo que trae como resultado que estos medios hiervan cambiando su estado de agregación, (Wacław, 1990).

El agua y las disoluciones acuosas se caracterizan por poseer una alta capacidad de enfriamiento pero a su vez hace que el enfriamiento sea demasiado rápido en las superficies de las piezas en las zonas de bajas temperaturas, existiendo así una gran dependencia de la capacidad de enfriamiento de la temperatura, lo que trae como resultado la aparición de grietas en muchos de los casos.

Los metales y sales fundidas regularmente poseen su temperatura de ebullición que supera en gran medida la temperatura de enfriamiento de las piezas, por lo que estos medios durante el proceso de enfriamiento no ebullicen, no cambian su estado de agregación y es por ello que sus curvas de enfriamiento no poseen cambios bruscos que muestren cambios de velocidades durante el proceso de enfriamiento.

## II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

### X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERIA MECANICA “COMEC 2019”



Por otra parte el enfriamiento en aceite posee una baja capacidad de enfriamiento la cual no tiene relación directa con la variación de la temperatura. Mientras mayor sea su uso, este se convierte en un líquido viscoso de color negruzco que puede servir de vehículo o medio idóneo para enmascarar muchos residuos tóxicos y peligrosos disueltos en él, aumentando así su efecto contaminante y los peligros de incendios. Las sustancias tóxicas que poseen los aceites industriales provienen de los aditivos añadidos, los cuales se agrupan en diversos grupos de compuestos tales como: fenoles, aminas aromáticas, terpenos fosfatados y sulfonados di-alquil-ditiofosfato de cinc, detergentes, poli-isobutilenos, poliésteres, que durante el uso del aceite a elevadas temperaturas forman peróxidos intermedios siendo estos muy tóxicos. En efecto los hidrocarburos saturados que contiene el aceite usado no son degradables biológicamente, por tanto, afectan la fertilidad de los suelos. Los compuestos de cloro, fósforo, azufre, arsénico, presentes en el aceite usado también dan gases de combustión tóxicos y el plomo, como elemento más volátil de los componentes metálicos forma cenizas de fácil suspensión, afectando así la salud de los seres humanos.

Así también las disoluciones poliméricas y acuosas que poseen velocidades intermedias de enfriamiento entre el agua y el aceite, necesitan de equipamientos especializados para tratar la contaminación de las aguas con elevadas concentraciones de sales, álcalis y subproductos industriales.

De aquí y la necesidad de buscar nuevas alternativas, desarrollar tecnologías, procedimientos y procesos que sean menos costosos, más ecológicos y capaces de brindar una mayor durabilidad, resistencia y tenacidad de las producciones tratadas.

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de un novedoso método o procedimiento de enfriamiento (Gurri Villafruela, 2014) al acero AISI D2, el cual consiste en someter el acero austenizado a un enfriamiento forzado utilizando el efecto del intercambio de calor convectivo generado en una cámara de enfriamiento bajo la influencia de la centrifugación. Este método nos brinda la posibilidad de obtener diferentes velocidades de enfriamiento variando las frecuencias de rotación e inyectar a la cámara de enfriamiento los gases recuperados u otros gases o agentes para estabilizar la temperatura en el intervalo de las zonas críticas de las transformaciones. Este nuevo método persigue entre sus objetivos el de proporcionar un enfriamiento más uniforme y homogéneo, sustituir los aceites de la práctica

industrial durante el temple de los aceros de alta templabilidad, minimizar las pérdidas energéticas, influir de forma favorable en la cinética de las transformaciones de fase, obtener propiedades y características mecánicas adecuadas para su explotación, reducir el riesgo potencial en la formación de grietas, deformaciones e imperfecciones estructurales, facilitar las operaciones tecnológicas, reduciendo los costos de fabricación de las herramientas, procesos e instalaciones y eliminar los efectos contaminantes hacia el medio ambiente logrando producciones más limpias y seguras.

## 2. Metodología

La presente investigación tiene como objetivo determinar la influencia que ejerce el enfriamiento por centrifugación sobre la propiedad mecánica de dureza en el acero AISI D2 y persigue el propósito de establecer el comportamiento entre las interrelaciones temperatura de austenización - frecuencia de rotación - temperatura de revenido en los niveles de dureza a alcanzar en el acero de alta templabilidad AISI D2, empleando para ello los métodos de investigación de la observación científica, experimentación y estadísticos.

Para la realización de los experimentos se elaboraron 36 probetas con dimensiones (10 x 10 x 55) mm, (ISO 377:2000), a partir de una barra de calidad comercial de acero AISI D2, (1.2379, X153CrMoV12). Se les aplicó un recocido isotérmico para homogeneizar y estabilizar la estructura, luego un calentamiento de austenización, y un revenido, ambos a diferentes temperaturas. Para el calentamiento se utilizó un horno eléctrico de cámara de laboratorio y para proteger las probetas de la descarburación, se empacaron en un contenedor en presencia de carbón vegetal. Luego de la austenización, las probetas se sometieron a un enfriamiento forzado en una instalación diseñada para tales fines empleando para ello el efecto de centrifugación. La variación de la velocidad del enfriamiento en el régimen de centrifugación se llevó a cabo variando las frecuencias de rotación. Para la medición de la dureza se utilizó un durómetro digital HRS-150 y se tomaron tres mediciones en cada probeta. La metodología de cálculo empleada para la determinación del tiempo de calentamiento de las probetas durante la austenización (2) fue el método para piezas denominadas técnicamente finas (según criterio de  $Bi \leq 0,25$ ) en un régimen de calentamiento a temperatura constante y

X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA "COMEC  
2019"

superiores a los 500 °C, el cual se realiza a partir de la ecuación diferencial de transferencia de calor (1), empleando el teorema de las semejanzas, (Некрасова, 2011).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{k_f - 1}{x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right] \quad (1)$$

donde:

$K_f$  - Coeficiente de forma;

$\alpha$  - Coeficiente de trasmisión de calor; W / (m<sup>2</sup>· K);

t - temperatura de calentamiento del cuerpo, °C;

$\tau$  - tiempo de calentamiento, h

$$\tau = t_{cal.} + t_{mant.} \quad (2)$$

$$\tau_{cal} = \frac{S \cdot \rho \cdot C_m}{3,6 \cdot K_f \cdot C'_{R,I}} (\xi_{final}^t \cdot \xi_{inic}^t) \quad (2.1)$$

donde:

S - Espesor de la capa; m

$$S = S_{real} \cdot k_d$$

$S_{real}$  - Espesor real de la capa de carbón vegetal, m

$k_d$  - Coeficiente de distribución de las probetas en el contenedor, tabla 3.4, (Некрасова, 2011)

$\rho$  - Densidad del acero a la temperatura de calentamiento, kg / m<sup>3</sup>

$C_m$  - Capacidad calórica media a la temperatura de las piezas en el intervalo de temperatura

$t_{inic.met.}$  - temperatura inicial del metal;  $t_{f.met.}$  - temperatura final del metal); J / (kg·K)

$K_f$  - Coeficiente de forma del cuerpo (para una lámina y un cilindro de longitud infinita  $K_f$  se toma como 1 y 2 respectivamente).

$C'_{R,I}$  - Coeficiente de emisividad (irradiación) reducida, tomando en consideración la transferencia de calor por convección, W / (m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)

$\xi_{final}^t$  y  $\xi_{inic}^t$  - Factor térmico final e inicial, k<sup>-3</sup>

$t_{mant.}$  - Tiempo de mantenimiento de las piezas a determinada temperatura, min/mm

$$t_{mant.} = 0,2Cr + 0,5W + V + Mo \quad (2.2)$$



**X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA "COMEC  
2019"**

El tiempo de mantenimiento para el temple por centrifugación se estableció en 5 minutos para todos los casos y para el revenido de 1 hora seguido de un enfriamiento al aire tranquilo. Los resultados obtenidos de las mediciones se procesaron estadísticamente aplicando el software Statgraphics 5.1.

**3. Resultados y discusión**

Para la realización del experimento se partió de la determinación de la composición química del material suministrado, el cual arrojó el siguiente resultado (en por ciento de masa): 1,55 %C; 0,52 %Mn; 0,45 %Si; 12,3 %Cr; 1,02 %V; 1,10 %Mo; 0,23 %Ni; por lo que se pudo comprobar que su composición se encuentra en el rango de la composición química del acero AISI D2, (C.Wegst, 2004). El régimen de tratamiento térmico aplicado para la experimentación se muestra en la tabla 1.

Tabla1. Tratamiento térmico aplicado a las probetas de acero AISI D2 (elaboración propia)

Probetas	Recocido °C	Temple			Revenido °C
		Pre calentamiento °C	Austenización °C	Frecuencia de rotación s <sup>-1</sup>	
1 - 9	860	815	980	17	200
10 - 18					400
					560
19 - 27	860	815	1030	17	200
28 - 36					400
					560

En la tabla 2, se muestran los resultados de los cálculos para el tiempo de calentamiento y de mantenimiento de las probetas durante las operaciones de recocido y temple.

**X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERIA MECANICA "COMEC  
2019"**

Tabla 2. Tiempos tecnológicos de calentamiento de las probetas durante las operaciones de recocido y temple  
(elaboración propia)

Probetas	Recocido isotérmico	Tiempo de calentamiento; h		
		Temple		Total
		Precalentamiento	Austenización	
1- 18	5	980 °C		1,002
		0,58	0,422	
19- 36		1030 °C		1,37
		0,58	0,787	

En la figura 1 se muestran los gráficos de los niveles de dureza obtenidos después de la austenización y temple empleando el enfriamiento forzado por centrifugación a distintas frecuencias de rotación y después de aplicado el temple más el revenido a diferentes temperaturas.

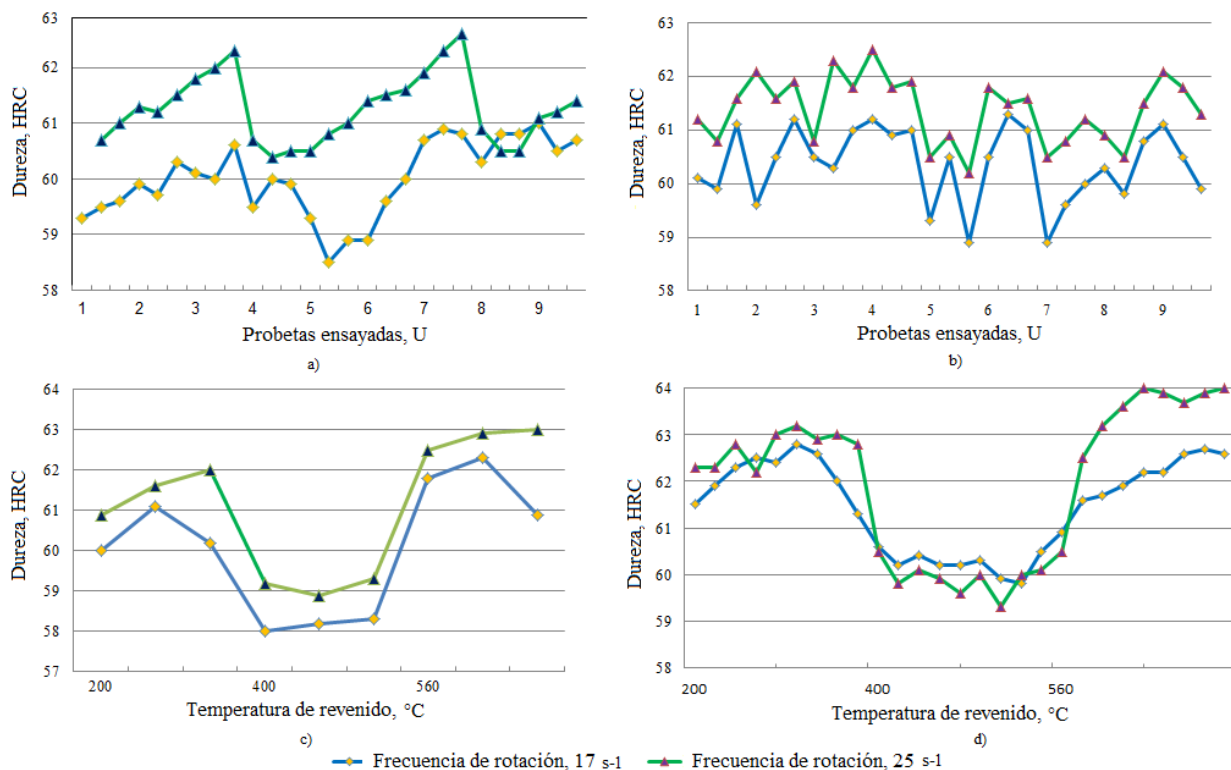


Figura 1. Comportamiento de la dureza después del temple por centrifugación y del temple y revenido a temperaturas de austenización de 980 °C (a y c) y 1030 °C (b y d), (elaboración propia).

## II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

### X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERIA MECANICA “COMEC 2019”



Como se ha evidenciado por investigaciones realizadas y en la práctica industrial actual, durante la austenización del acero AISI D2 se emplean varios regímenes de calentamiento, entre los cuales se encuentren los rangos de bajas temperaturas (960 – 980) °C, temperaturas intermedias (1020 - 1030) °C, y de altas temperaturas (1050 - 1100) °C, (ГОСТ 5950-2000), (BÖHLER, 2016); pero también se utilizan rangos entre (982 – 1024) °C, (995 - 1025) °C (ASM, Metals Handbook, 1991), (SECO/WARWICK Corp., 2011), (Alro Steel, 2017), (Crucible Materials Corporation), y hasta 1200 °C, (Виницкий А.Г., 1972). El calentamiento a elevadas temperaturas de austenización puede ocasionar imperfecciones estructurales, tales como la descarburación, crecimiento del grano, bajos niveles de resistencia, bajos niveles de dureza, entre otros. Por tal motivo para la realización de este experimento se tomó como temperatura máxima de calentamiento de austenización 1030 °C.

Al analizar los valores de dureza obtenidos, figura 1, después de realizado el enfriamiento por centrifugación desde temperaturas bajas (980 °C) e intermedias de austenización (1030 °C), podemos observar que se alcanzan valores similares e incluso superiores a los que se obtienen cuando el enfriamiento se realiza al aire tranquilo, chorro de aire, aire caliente, en aceite, en sales, lo cual evidencia que el enfriamiento por centrifugación favorece el mecanismo de endurecimiento primario, proporcionando una alta resistencia al desgaste y una moderada resistencia al impacto. Por otro lado, la temperatura intermedia de austenización favorece la disminución de los carburos no disueltos en la matriz, lo que conlleva a una mayor estabilidad térmica durante la explotación de las herramientas, sin embargo esto puede conllevar a un aumento de la austenita retenida en su composición estructural. La presencia del molibdeno y el vanadio como elementos de aleación, hace posible que a estas temperaturas aún no se observe un aumento apreciable del grano austenítico, manteniendo así, buenos niveles de dureza y resistencia y proporcionando una mayor estabilidad durante el revenido y donde la dureza se mantiene en niveles altos no descendiendo de (55 – 56) HRC, lo que favorece la resiliencia dinámica y la resistencia a la flexión del material.

En las figuras 2 y 3, se muestran los resultados obtenidos del procesamiento estadístico de los valores de dureza, donde podemos apreciar que durante el calentamiento de austenización a

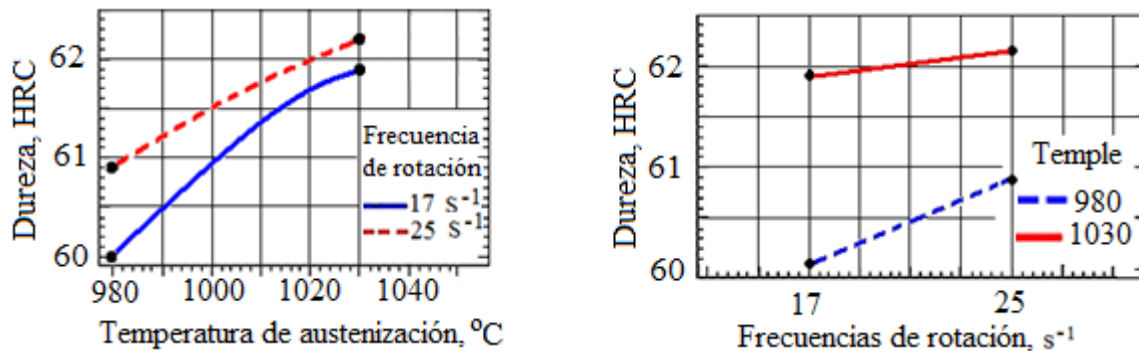


Figura 2. Gráficas de interacción de la dureza en función de la temperatura de austenización y las frecuencias de rotación en la operación de temple, (elaboración propia).

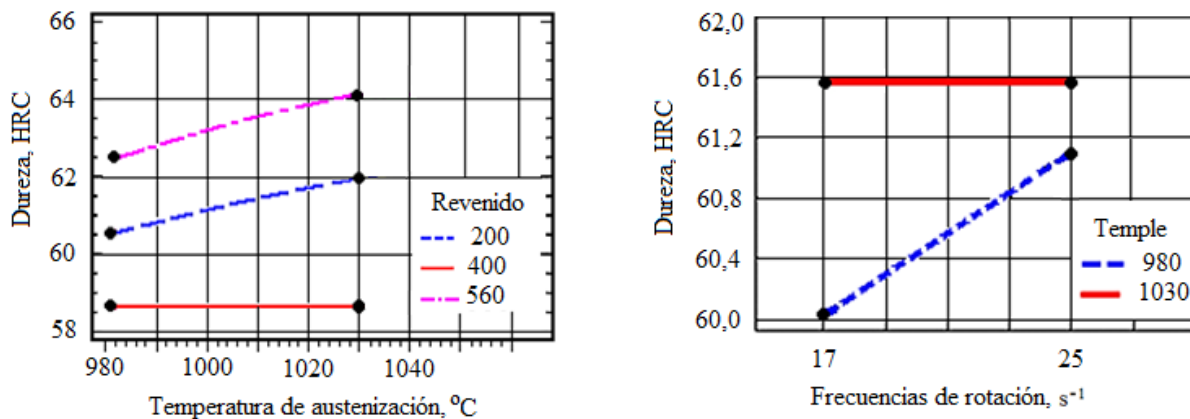


Figura 3. Gráficas de interacción de la dureza en función de la temperatura de austenización, frecuencias de rotación y de revenido en las operaciones de temple y revenido, (elaboración propia).

980 °C y el temple forzado por centrifugación con frecuencias de rotación de 25 s<sup>-1</sup> se obtiene un nivel de dureza con un valor promedio de 61,5 HRC y después del temple con enfriamiento por centrifugación con frecuencias de rotación de 17 s<sup>-1</sup> seguido del revenido a 400 °C muestran mejores resultados en cuanto a características de tenacidad con un valor de 59, 83 HRC. A la temperatura de austenización de 1030 °C seguido del enfriamiento con una frecuencia de rotación de 25 s<sup>-1</sup> y el revenido a 560 °C se obtienen los valores más elevados en cuanto a resistencia al desgaste con un valor de promedio de dureza de 63,8 HRC y un máximo de dureza de 64,14 HRC.

X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA “COMEC  
2019”

#### 4. Conclusiones

Basados en los resultados obtenidos de la investigación realizada al acero AISI D2 se puede concluir que el enfriamiento por centrifugación constituye un medio y/o método de enfriamiento que garantiza los niveles necesarios de propiedades mecánicas de dureza de este acero, mediante el cual variando las frecuencias de rotación se puede influir en el efecto termodinámico de los parámetros del proceso de enfriamiento en diferentes intervalos temperaturas. El empleo de este nuevo método ofrece la posibilidad de sustituir los aceites minerales de la práctica industrial del tratamiento térmico de los aceros de alta templabilidad, permite reducir los tiempos tecnológicos de tratamientos y de fabricación de las herramientas y disminuir los niveles de contaminación ambiental, logrando así producciones más limpias y seguras. Es un medio tecnológicamente viable y como perspectiva ofrece la posibilidad de poder combinarlo con otros medios para influir en la cinética de las transformaciones de fases, atenuando el riesgo de la formación de grietas, deformaciones e imperfecciones estructurales. Se recomienda su empleo para el temple de herramientas de pequeñas y medianas dimensiones tales como punzones, matrices, terrajas, machos, brochas, entre otras.

#### 5. Referencias bibliográficas

1. Alro Steel. (20 de 01 de 2017). *alro.com. Alloys and Tool Steel*. Obtenido de [www.alro.com](http://www.alro.com)
2. Asada, S., & Ogino, M. (1996). Reduced pressure quenching oil and distortion. En F. K. Totten GE (Ed.), *Proceedings of 2 nd International Conference on Quenching and Control of Distortion* (págs. 395-39). Materials Park, OH: ASM International.
3. ASM, Metals Handbook. (1991). *Volume 4: Heat Treating*. ASM International.
4. B.A. Ahmed, K. R.-u.-H. (2012). Synthesis of Laser Beam Rapidly Solidified Novel Surfaces on D2 Tool Steel. *Key Engineering Materials, 510-511* , 493- 499.
5. BÖHLER. (2016). *Ficha técnica*. Recuperado el 12 de Enero de 2017, de BÖHLER Corporation: [www.bohler-edelstahl.at](http://www.bohler-edelstahl.at)
6. Bohler-Uddeholm, C. (Junio de 2013). *www.bucorp.com*. Recuperado el 15 de Enero de 2017
7. Božidar Lišcic, T. H. (2010). *Quenching Theory and Technology* (Second ed.). United States of America: Taylor and Francis Group, LLC.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA “COMEC  
2019”

8. Brison W.E. (2015). *Heat Treatment. Master Control Manual*. Munich: Hanser Publications, Cincinnati.
9. C.Wegst, M. (2004). *Key to Steels Database*. Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf.
10. Canale, F. L., & Totten, G. E. (2005). *Quenching Technology: A Selected Overview of the Current State-of-the-art*. (Vol. 8). Materials Research.
11. Crucible Materials Corporation. (s.f.). *CRUCIBLE Data sheet*. Recuperado el 8 de Febrero de 2016, de Crucible Service Center: [www.crucibleservice.com](http://www.crucibleservice.com)
12. Gurev A.M, & Voroshnyn L.G., J. Y. (2005). Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей. Endurecimiento termocíclico y químico-termocíclico de los aceros. *Ползуновский вестник №2 (ч. 2)*.
13. Gurri Villafruela, G. (2014). *Influencia del temple por centrifugación sobre la dureza del acero para herramientas D2*. Tesis de Maestría, Universidad de Holguín, Ingeniería Mecánica.
14. Hadi, G. N., & Mohammad, J. (2015). Alternative phase transformation path in cryogenically treated AISI D2 tool steel. *Materials Science & Engineering A*, 32-36.
15. Hongtao, D. a. (2013). Improving machinability of high chromium wear-resistant materials via laser-assisted machining. (17), 246–269.
16. ISO 377:2000. (2000). Steel and steel products - location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing.
17. Jai Hindus.S, H. K. (2014). Experimental investigation on laser assisted surface tempering of AISI D2 tool Steel. *12th GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCMM 2014* (págs. 1489 - 1495). Procedia Engineering 97.
18. Jaramillo, R. A.-L. (2004). Effect of 30 Tesla Magnetic Field on Transformations in a Novel Bainitic Steel. Investigation of austenite decompositions in high-carbon-strength Fe-C-Si-Mn steel under 30-Tesla magnetic field. *Scripta Materialia*(52), págs. 461-466.
19. Jones W.R. (1996). Vacuum Heat treating for M2 Hight Speed and D2 tool steels. *Proceeding of the 16th ASM Heat Treatin Society Conference & Exposition*, (págs. 19 - 21). Ohio. Cincinnati.
20. Kobasko NI, A. M. (2003). Metallurgy of intensive quenching process and implications with respect to steel properties proceedings of the 58 th Congresso Anual da ABM; 2003 July 21-24; Rio de Janeiro, Brazil. São Paulo: ABM Brazil; 200. *proceedings of the 58 th Congresso Anual da ABM*, (págs. 3362-3380). Rio de Janeiro. Brazil. São Paulo: ABM Brazi.
21. Saha S.K., L. P. (2012). Experimental investigations on heat treatment of cold work tool steels: part 1, air-hardening grade (D2). *IJERA*, 2, 510-519.
22. SECO/WARWICK Corp. (2011). Heat Treating Data Book.Tenth Edition E- Book. Cap 4. USA.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL  
“II CCI UCLV 2019”



X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA “COMEC  
2019”

23. Sibgatulin G.G, T. P. (1982). Endurecimiento de la herramienta de corte por la acción de impulsos de corriente”; (suplemento a la revista “Industria de la Aviación”, , pág.31. (3).
24. Sverdlin AV, N. A. (1997). Hardening of steel parts using wave technology. En P. D. Milam D (Ed.), *Proceedings of 17 th Heat Treating Society Conference Proceedings Including the 1st International Induction Heat Treating Symposium* (págs. 33-39). Materials Park, OH: ASM International.
25. Tated, R. G., & Patil, P. I. (2012). Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels : A Review. *International Conference in Computational Intelligence (ICCI)* (págs. 10-29). International Journal of Computer Applications® (IJCA).
26. Totten GE, B. C. (1993). *Other Quenching Processes. Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. (B. C. Totten GE, Ed.) Materials Park, OH: ASM International.
27. Totten GE, W. G. (1996). Quenching fundamentals: effect of agitation. *Adv.Mat. & Proc*, 149(2), 73-76.
28. Uddeholm. (2016). *AISI D2 Cold Work tool steel. Datos de aceros para Herramientas*. Obtenido de Uddeholm: <https://www.uddeholm.com/iberica/es/>
29. Waclaw, L. (1990). *chlodziwa hartowniczy. Medios para Temple*. (M. S.B., Trad.) Metalúrgia.
30. Wołowiec E., K. P. (2012). Heat treatment of tool steels in vacuum furnaces with gas quench. Review of industrial applications, Part 1,2. Heat Treatment Equipment. SECO/WARWICK Corp.
31. А. В. Алифанов, Ж. А. (2012). Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле. *Литье и металлургия*, 4(68), 151 -155.
32. Бернштейн М.Л., П. В. (1987). *Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле.s.l. Tratamiento Térmico de piezas de acero en campos magnéticos* . Rusia: Машиностроение.
33. Веницкий А.Г., д. (1972). Материаловедение и термическая обработка металлов.
34. Воробьева Г.А, С. Е. (2005). *Инструментальные материалы*. Политехника.
35. ГОСТ 5950-2000, П. п. (s.f.). *info@opengost.ru*. Recuperado el 2018, de [www.OpenGost.ru](http://www.OpenGost.ru)
36. Некрасова, В. (2011). *Технология термического производства. Способы наноструктурирования материалов*. Изд-во Перм. гос. техн. ун-та.