

Endurecimiento combinado en engranajes cilíndricos de dientes rectos.

O. González Quintero, E. Alfonso Brindis.

Facultad de Ingenierías Química y Mecánica. Universidad de Matanzas.
Plácido 7106 entre San Antonio y Ánimas. Versalles. Matanzas.
Teléfono: 295733. Cuba.

(Recibido el 12 de agosto de 2007; aceptado el 13 de diciembre de 2007)

Resumen.

Las ruedas dentadas son componentes de los mecanismos y máquinas muy comunes, siendo las cilíndricas de dientes rectos una de los tipos más importantes, es por ello que a su proceso de fabricación se le presta gran atención, existiendo múltiples tecnologías que garantizan su trabajo sin fallas y duradero, pero la mayoría con un alto costo de producción. Resultado de este interés en la actualidad se vienen aplicando cada vez más algunas formas alternativas de mejorar la resistencia de los metales, entre ellas el tratamientos mecánico-térmico aplicado en este trabajo: el endurecimiento combinado, combinación del endurecimiento por deformación plástica y el endurecimiento por envejecimiento artificial.

El objetivo de este estudio es determinar la influencia de las fuerzas de engranaje y del tiempo de tratamiento mecánico-térmico en las propiedades mecánicas: microdureza y profundidad de acritud de las capas superficiales de ruedas dentadas cilíndricas de dientes rectos, obteniendo un modelo estadístico matemático que relaciona las variables antes citadas con la dureza de las capas superficiales en engranajes cilíndricos de dientes rectos de acero de mediano contenido de carbono cuya composición química se corresponda con las establecidas en el presente trabajo.

Palabras claves: Engranajes, endurecimiento combinado, microdureza, deformación plástica, envejecimiento.

1. Introducción.

Los engranajes tienen una amplia difusión y responsabilidad en las máquinas, mecanismos y equipos en general, es por ello que a su proceso de fabricación se le presta gran atención, existiendo múltiples tecnologías que garantizan su trabajo sin fallas y duradero, pero la mayoría con un alto costo de producción, pues requieren entre otras cosas de costosos, prolongados y en ocasiones nocivos para la salud humana, tratamientos y/o recubrimientos superficiales y del tratamiento térmico en cualesquiera de sus variantes; además de las costosas operaciones del rectificado abrasivo, como proceso final.

En la actualidad se vienen aplicando cada vez más algunas formas alternativas de mejorar la resistencia de los metales: los tratamientos termomecánicos y mecánico-térmicos, consistentes en la aplicación, simultánea o no, de calor y el proceso de deformación a una aleación con la consecuente refinación de su microestructura.

En este trabajo los engranajes fueron sometidos a un tipo de tratamiento mecánico-térmico que consiste en

combinar la deformación plástica con el tratamiento térmico (envejecimiento artificial), para la obtención de elevados índices de calidad de sus capas superficiales, con la intención de elevar la seguridad y longevidad de las mismas con un mínimo impacto ambiental.

Precisamente, una de las ventajas del envejecimiento es que el material puede endurecerse por tratamiento térmico a baja temperatura después que el material ha sido trabajado y terminado en su geometría final. Debido a esta ventaja, el envejecimiento es aplicado a los aceros con varios rangos de contenido de carbono. El envejecimiento comprende una alta resistencia a la tracción, precisión geométrica y calidad de la superficie, porque el acero se endurece a baja temperatura después del la conformación [3, 7].

El objetivo del presente estudio es determinar la influencia de las fuerzas de engranaje y del tiempo de sometimiento de las probetas al tratamiento mecánico-térmico en las propiedades mecánicas: microdureza y profundidad de acritud en las capas superficiales de ruedas dentadas cilíndricas de dientes rectos.

2. Materiales y método.

El tratamiento mecánico-térmico encierra las siguientes etapas: aumento de la densidad de las dislocaciones por intermedio de la deformación plástica y reestructuración de las dislocaciones en las sub-fronteras (formación de una estructura poligonal o celular, en dependencia del tipo de tratamiento térmico a que se someta el material). A este tipo de tratamiento, en principio, puede ser sometido cualquier metal o aleación metálica [1].

La composición química del material de las probetas en este estudio se determinó por medio del análisis espectral realizado en el laboratorio de espectrometría del CIME, con un Espectrómetro Multicanal Digital, con una incertidumbre en las mediciones del 1%, amparados en la norma ASTM-E-415, correspondiéndose con un material base hierro, acero estructural al carbono, de mediano contenido de carbono, concretamente acero 40, según la Norma Gost 1050 (equivalente al acero AISI 1040), el que presentó la composición química que se muestra en la tabla 2.

Por otra parte, en la Tabla 1 se muestran los parámetros básicos de las probetas (engranajes cilíndricos de dientes rectos) que intervienen en el estudio, son ruedas dentadas normales, es decir fueron talladas sin desplazamiento de la cremallera básica.

Tabla 1: Parámetros básicos de las probetas.

Parámetros (mm)	probeta
diámetro de la circunferencia exterior, d_e	78,00
diámetro de la circunferencia primitiva, d	72,00
diámetro de la circunferencia interior, d_i	64,50
diámetro de la circunferencia básica, d_o	67,66
número de dientes, z	24
ancho, b	25
coeficiente de corrección, x	0,00

El experimento consistió en hacer funcionar una transmisión por engranajes, donde el elemento motriz es la herramienta deformadora, engrane de acero aleado Cr12Mo, equivalente al AISI D2, con una dureza de 56 HRC y el elemento movido es la probeta, engrane de acero 40, en estado de suministro, sometida a las condiciones de carga que se indican en la tabla 5. Se tuvo en cuenta que la acritud dirigida (deformación plástica de la pieza terminada con ayuda de la carga que

coincide por la dirección de su acción con la de la explotación) con procedimientos de endurecimiento que crean en las capas superficiales tensiones de compresión, favorecen el aumento de la resistencia mecánica de las mismas.

Completado el tratamiento mecánico, a las ruedas dentadas se les aplicó el tratamiento térmico, envejecimiento artificial, completando así el tratamiento mecánico-térmico propuesto, las probetas fueron calentadas hasta una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$, con un tiempo de permanencia en el horno de una hora y su posterior enfriamiento dentro del mismo. El proceso de tratamiento mecánico térmico aplicado consiste en los pasos ilustrados en la figura 1.

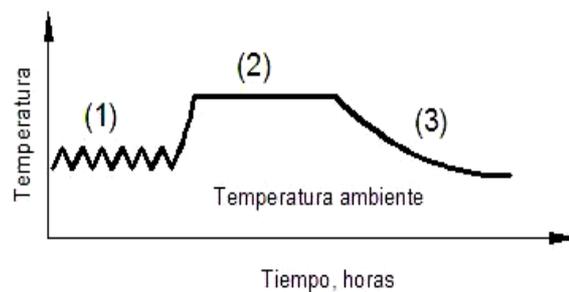


Figura 1. Diagrama esquemático del tratamiento mecánico térmico:

- (1) Tratamiento mecánico (Deformación plástica);
- (2) Tratamiento térmico (envejecimiento artificial);
- (3) Enfriamiento dentro del horno.

Esta combinación, el endurecimiento por deformación plástica con la formación de una estructura celular dislocacionada y el envejecimiento artificial para lograr la estabilidad de este estado altamente energético eleva las propiedades mecánicas y de explotación de los metales, en particular los que posean una red cristalina cúbica centrada en el cuerpo, como en el caso del acero 40 que fue objeto de estudio.

Al realizar el tratamiento mecánico previo al tratamiento de endurecimiento por precipitación, el metal es entonces trabajado en frío mas fácilmente y la reacción del envejecimiento ocurre a una temperatura más baja porque los planos de deslizamiento sirven como núcleo para la precipitación. Sin embargo, la temperatura del proceso de envejecimiento que sigue al trabajo en frío puede relajar algo la acritud y causar una ligera pérdida de dureza, no obstante la dureza final es mayor que la desarrollada por cualquiera de los dos métodos aislados. Este procedimiento es conocido también como Endurecimiento Combinado [7].

Tabla 2: datos del material de las probetas.

Composición química (%) de la muestra								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0.42	0.32	0.55	0.002	0.019	0.07	0.02	0.06	0.01

Antes de las mediciones de microdureza, fue necesario cortar las ruedas dentadas (probetas), dadas las características del equipo donde se realizaron las mismas y para proveer múltiples probetas de los dientes, el corte se realizó de manera manual y relativamente alejado de la zona de medición con el propósito de que el mismo no influyera en los resultados. En la figura 2 se muestra el diente de la probeta después de realizado el corte.

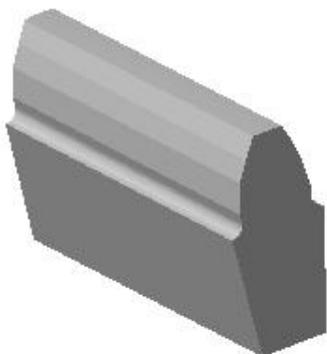


Figura 2. Forma del diente de la probeta

El diseño experimental seleccionado fue el factorial de múltiples niveles, (2^2). El orden de los experimentos fue completamente aleatorio, las variables del experimento se muestran en las tablas 3 y 4, los valores de éstas, en cada uno de los niveles experimentales son mostrados en la tabla 5, los valores de la fuerza normal fueron establecidos de manera que garanticen una tensión de contacto superior al límite de fluencia del material de las probetas.

Tabla 3: Variables independientes.

1	tiempo, t (h)
2	Fuerza normal, Fn (N)

Tabla 4: Variables dependientes.

1	microdureza
2	profundidad de acritud

Tabla 5: Valores de las variables independientes

niveles	Variables independientes	
	1	2
1	6 horas	1.1e4 N
2	3 horas	7.6e3 N

Los restantes parámetros de los experimentos fueron:

- material de la herramienta
- material de la probeta
- frecuencia de rotación durante el tratamiento mecánico, $n=180 \text{ min.}^{-1}$.

A las muestras se les realizó un perfil de microdureza, con el objetivo de evaluar la deformación plástica producida durante el tratamiento mecánico para los diferentes niveles experimentales y determinar la profundidad de la acritud. Las mediciones se realizaron con un microdurómetro marca CHIMADZU, modelo M, en el laboratorio del Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinarias del ISPJAE, utilizando una carga de 0.981 N para un tiempo de 5 segundos de aplicación de la misma y realizándose en línea recta desde la superficie hacia el interior del diente a partir de una distancia de 3,06 mm desde la cabeza del diente como es mostrado en la figura 3.

Las penetraciones se llevaron a cabo de manera tal que la distancia desde el centro de la huella hasta el borde del material o hasta la arista de la huella adyacente fuera al menos dos veces y media la diagonal de la misma, para evitar cualquier influencia mutua de las penetraciones. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente. El lapso de tiempo entre mediciones fue de 30 minutos para permitir cualquier recuperación elástica [4]. Fue tomado como patrón de comparación una probeta a la que no se le aplicó el tratamiento mecánico-térmico.

2. Resultados y discusión.

En los perfiles analizados se observó que en las probetas sometidas al tratamiento explicado la profundidad de acritud alcanza una magnitud de 487.9 μm , siendo el mayor promedio de microdureza (2082,3 MPa), alcanzada por la probeta No.1, sometida a un tiempo de deformación de 6 horas, considerando una fuerza normal de 1.1e4 N, el más bajo se obtuvo en la probeta No.4 (1720,9 MPa), que fue sometida a tres horas de tratamiento mecánico con una fuerza normal de 7.6e3 N. El promedio de microdureza de la probeta patrón fue de 1649,9 Mpa. En la figura 4 se muestra una comparación entre los perfiles de microdureza de la probeta No.1 y la probeta patrón.

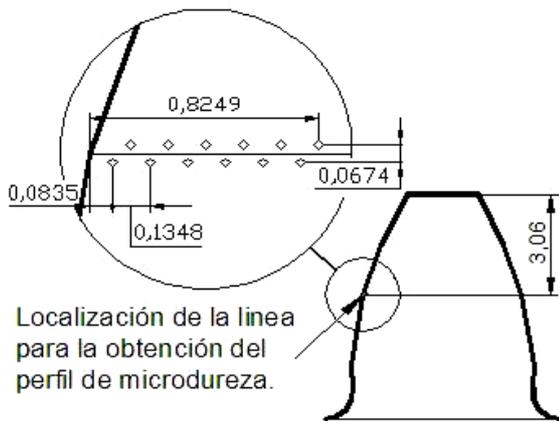


Figura 3. Localización de la línea donde se obtuvo el perfil de microdureza.

Teniendo en cuenta que a partir de la octava penetración, en todas las variantes, los resultados de las mediciones de las diagonales de las huellas estaban dentro del rango de microdureza de la probeta patrón, en este estudio durante el cálculo de los promedios de microdureza de la capa endurecida sólo fueron consideradas las siete primeras penetraciones. Las capas superficiales sometidas a la aplicación del tratamiento propuesto, en el caso de las transmisiones por ruedas dentadas, están sujetas a deformación plástica cíclica inducida por la entrada y salida del diente en el engrane, por lo tanto, el comportamiento elasto-plástico del

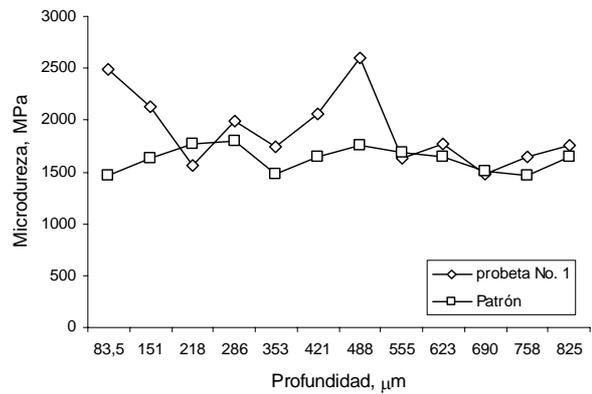


Figura 4. Perfil de microdureza de la probeta No.1 y la probeta patrón.

material cerca de la superficie puede ser completamente diferente de aquel encontrado en las capas subyacentes. En la tabla 6 se muestran las condiciones de la deformación y el comportamiento de los promedios de microdureza de la capa endurecida en las probetas estudiadas, en la Figura 5 se muestra un gráfico que ilustra estos resultados y en la Figura 6, por otra parte, se muestra la comparación de las líneas de regresión, que ilustra el comportamiento de los promedios de microdureza para cada variante, de acuerdo con los diferentes valores del tiempo de deformación plástica y de la fuerza normal al perfil de los dientes.

Tabla 6: Comportamiento de los promedios de microdureza por experimento.

Matriz experimental			Microdureza MPa	Profundidad de acritud µm
Probeta No.	Tiempo horas	Fuerza normal N		
1	6	1,10E+04	2082,3	487.9
2	6	7,60E+03	1800,1	487.9
3	3	1,10E+04	2000,1	487.9
4	3	7,60E+03	1720,9	487.9

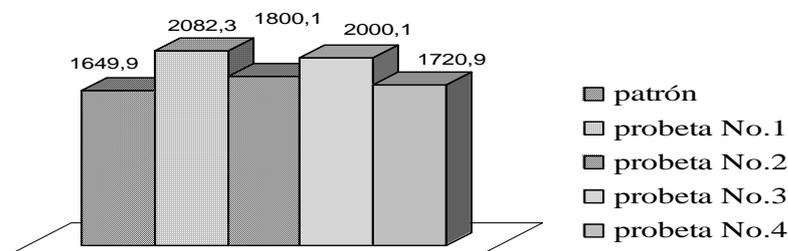


Figura 5. Microdureza promedio por experimento, MPa.

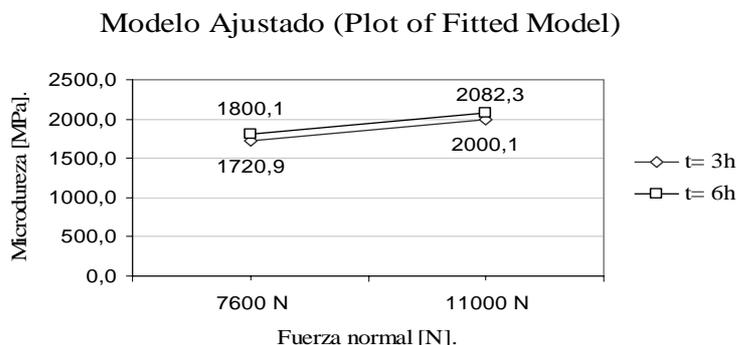


Figura 6. Comportamiento de los promedios de microdureza.

En la figura 6 se puede observar un paralelismo entre las líneas de regresión, lo que corrobora la precisión de las mediciones. Estas líneas muestran que para iguales valores del tiempo a que es sometida la probeta al tratamiento mecánico, el aumento de la fuerza de contacto (normal) conduce al aumento del valor de la microdureza. En correspondencia con la observación anterior, se aprecia que para iguales valores de la fuerza de contacto, el aumento del tiempo de tratamiento mecánico también acarrea el mismo resultado.

En la Figura 7 se representa la superficie de respuesta estimada, que muestra el contorno de la microdureza en función de la combinación de la fuerza normal y del tiempo de tratamiento mecánico, es decir cada línea del contorno representa la combinación de las variables independientes que dan el valor de la variable dependiente.

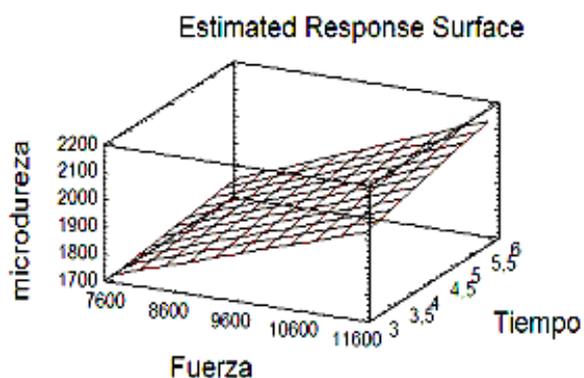


Figura 7. Superficie de respuesta estimada.

De acuerdo al modelo experimental obtenido y reflejado en la expresión 1, tanto el aumento del número de ciclos de trabajo de la probeta (tiempo, t), como el aumento de la fuerza de contacto normal (Fn), traen consigo un aumento de la dureza en la capa superficial, (HV), sometida al tratamiento mecánico - térmico, en aceros que presenten la composición química

especificada con anterioridad. Los resultados del modelo de regresión lineal múltiple muestran que existe una relación significativa entre las variables con un nivel de confianza de 99%.

$$HV = 1005,58 + 0,0814265 * Fn + 28,2833 * t \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Como el material estudiado, acero 40, mantiene su estructura ferro perlitica, luego del tratamiento mecánico - térmico, se deduce que la elevación de la dureza como resultado del mismo, son debidas al aumento de la densidad de las dislocaciones, al incremento de los defectos de apilamiento en la red cristalina y por consiguiente a la elevación de las tensiones residuales, así como al endurecimiento por precipitación, que involucra la formación de partículas finas (precipitados) que se convierten en obstáculos para el movimiento de las dislocaciones y hacen más resistente y duro el metal.

El endurecimiento por deformación del metal, debido a su propia deformación plástica, en gran medida depende del estado tensional en que se encuentre en las zonas submicroscópicas (en los volúmenes de las redes cristalinas) y microscópicas. De acuerdo a lo conocido, el movimiento de un par de dislocaciones genera el movimiento de centenares y centenares de ellas, consecuentemente la distancia promedio de separación entre las mismas disminuye. Este fenómeno provoca el apilamiento de estos defectos, se deforma su estructura cristalina y cambian sus propiedades, el metal se endurece, disminuye su densidad y se acentúa la anisotropía de sus propiedades (los cristales orientados irregularmente inicialmente, vuelven sus ejes de mayor resistencia poniéndolos en la dirección que sigue la deformación [1, 6].

Resulta necesario destacar que en el caso que trata este trabajo, el tamaño del grano no se hace más pequeño, sino que se aplasta y de equiaxial pasa a tener los ejes desiguales, conservando la misma área de

sección transversal, pero, la trituración de los bloques cristalinos, formación de una estructura celular dislocacionada que acompaña a la deformación plástica, provocan también el endurecimiento por deformación, debido a que las fronteras de los bloques del mosaico elevan la resistencia al desplazamiento de las dislocaciones.

3. Conclusiones.

1. Se obtuvo un modelo estadístico matemático que relaciona las variables tiempo de tratamiento mecánico y resultante de las fuerzas de engranaje con la dureza de las capas superficiales en engranajes cilíndricos de dientes rectos de acero de mediano contenido de carbono cuya composición química se corresponda con las establecidas en el presente trabajo (con una temperatura de envejecimiento de $110 \pm 5^\circ \text{C}$).
2. En todos los casos en que se aplicó el tratamiento mecánico térmico (Endurecimiento Combinado) se obtuvieron valores de dureza superiores a la dureza de la probeta patrón, variando desde un 4% mayor en la probeta menos cargada hasta un 26% en la más cargada.
3. Se reducen notablemente los gastos en recursos humanos y materiales, mediante la utilización eficiente del endurecimiento combinado, como operación final del proceso de fabricación.
4. Las distorsiones térmicas son reducidas significativamente.

5. Bibliografía.

1. Alfonso Brindis, E, "Apuntes sobre la interrelación entre la composición microestructura - propiedades del acero", Universidad de Matanzas, 2002. Disponible en la Intra web de la UMCC en <http://lib.fiqm.umcc.cu/download.asp?id=steel/cover.pdf&typ=book>
2. Bektes M. et al: "Vickers Microhardness Studies of Fe-Mn Binary Alloys", Chinese Journal of Physics Vol. 42, NO. 6, 2004, Disponible en la World Wide Web en <http://psroc.phys.ntu.edu.tw/cjp/v42/733.pdf>
3. Kuboki, T. et al: "Evaluation Method of Microstructure for Prediction of Ageing Progress in Hypo - Eutectoid Carbon Steel", VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII. CIMNE, Barcelona, 2005, Disponible en la World Wide Web en <http://congress.cimne.upc.es/complas05/admin/Files/FilePaper/p163>.
4. Kunjomana, A. G.; K. A. Chandrasekharan: "Microhardness studies of GaTe whiskers", Cryst. Res. Technol. 40, No. 8, 782 – 785, 2005. Disponible en la World Wide Web en http://www.crystalresearch.com/crt/ab40/782_a.pdf.
5. Roylance, D.: "The Dislocation Basis of Yield and Creep". Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139, 2001, 15 pág. Disponible en la World Wide Web en <http://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/dn.pdf>
6. Van Vlack, L. H.: "Elements of Materials Science", Ed Addison Wesley, USA, 1967, 445 pág., 275-333.
1. Alfonso Brindis, E, "Apuntes sobre la interrelación entre la composición

Combined hardening in cylindrical gears of right teeth.

Abstract.

Gears are an extremely common mechanism component used in many machines, being the spur gear one of the most fundamental types, because of is paid great attention to their process of production, multiple technologies that guarantee their work without failures and durable exist, but most with a high production cost. Result of this interest at the present time one comes applying more and more, some alternative forms of improving the resistance of the metals, among them the Mechanic-thermal Treatments applied in this work: the combined hardening, combination of the hardening for plastic deformation and the artificial age hardening.

The objective of this study is to determine the gear forces and time of Mechanic-thermal Treatment influence in the mechanical properties: micro hardness and depth of work hardening, of the outer layers of spur gears, obtaining a mathematical statistical model that relates the variables before mentioned with the hardness of the superficial layers in steel of medium content of carbon spur gears whose chemical composition belongs together presently with the established ones work.

Key words: Gears, combined hardening, micro hardness, plastic deformation, aging.