

Nuevas orientaciones para calcular la profundidad efectiva de la capa endurecida en engranajes de acero cementado

G. González Rey.

Profesor Principal de Elementos de Máquinas.

Miembro Académico de AGMA y de ISO TC60 (engranajes).

Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría* (ISPJAE).

Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Mecánica Aplicada

calle 116 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba.

Teléfono: (537)-202267, Fax: (537)-277129 E-mail: cidim@mecanica.ispjae.edu.cu

(Recibido el 4 de abril de 1998; aceptado el 23 de octubre de 1998)

Resumen

Se exponen y discuten los inconvenientes de las clásicas y conocidas recomendaciones para decidir el espesor efectivo de capa endurecida en los dientes cementados de engranajes cilíndricos y cónicos. Además, se exponen los recientes trabajos realizados por ISO TC60/WG 14 en la normalización de la profundidad efectiva de capa cementada, tomando como base las propuestas alemana y estadounidense. Es verificada mediante 5 ejemplos la aplicabilidad del estado actual de las recomendaciones de profundidad efectiva de capa cementada en los engranajes sin riesgo de fragilidad y capaz de garantizar la resistencia mecánica necesaria en los flancos de los dientes ante el daño por exfoliación (case crushing) o picadura superficial.

Palabras claves: engranajes, cementado, norma ISO, espesor de capa endurecida.

1. Introducción

Es conocido, a partir de múltiples referencias dadas en escritos griegos y romanos, que durante épocas tempranas de la antigüedad el acero fue endurecido de variadas formas por el hombre. La cementación fue uno de los procesos empleados durante varios miles de años, más o menos intencionalmente, para aumentar la dureza superficial del acero. A pesar de ello, no fue hasta 1781 que fueron establecidos algunos de los fundamentos para la mejora de la cementación, cuando Bergman de Upsala puntualizó que la diferencia entre el hierro forjado (maleable), el hierro fundido y el acero estaba en el contenido de carbono [1]. Según estudios realizados por Pedersen y Rice[1] se observa que solo en los últimos 60 años la cementación ha podido ser tratada como una ciencia al ser controlados los procesos necesarios para lograr una adecuada saturación por difusión de la capa superficial del acero con carbono.

En la actualidad, la cementación es el procedimiento más generalizado en los engranajes cuando se necesita aumentar la dureza superficial de los dientes dejando prácticamente intacta la tenacidad del núcleo, requerimiento ineludible cuando son exigidos engranajes de elevada resistencia al desgaste y de gran capacidad de carga. Véase la figura 1

La capa cementada en los dientes de engranajes es básicamente controlada especificándose los siguientes aspectos:

- Dureza superficial. Su valor está asociado con la resistencia superficial y puede oscilar entre 58HRC y 64 HRC.

- Dureza del núcleo. No es recomendable un valor elevado, pues puede ser elaborado un engranaje con dientes frágiles.

- Profundidad efectiva de capa cementada. Es la distancia medida perpendicularmente desde la superficie del diente hasta el punto donde la dureza es superior o igual a 52 HRC[2] y después de las operaciones de acabado.

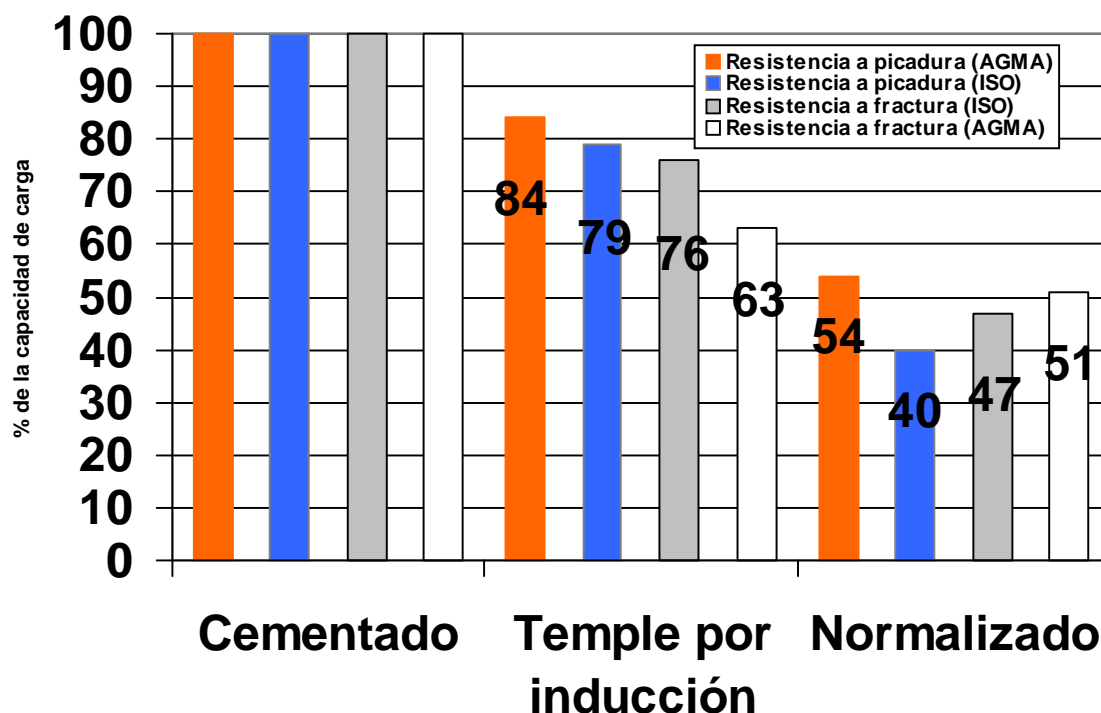


Fig. 1. Valores comparativos de la influencia que ejercen diferentes tipos de tratamientos térmicos en la capacidad de carga de los engranajes .

2. Recomendaciones para determinar la profundidad efectiva de la capa cementada basadas en el módulo del diente

Es comprensible que el espesor efectivo de capa cementada no debe ser elevado debido al riesgo de fragilidad, pero tampoco escaso, pues puede conducir a dientes con una profundidad de capa inadecuada incapaz de garantizar la resistencia mecánica necesaria para evitar un daño severo en los flancos del dientes por exfoliación (*case crushing*) o picadura superficial (*pitting*).

En el pasado reciente, los ingenieros de engranajes se especializaban casi exclusivamente en los parámetros geométricos y de generación de los flancos con influencia en la resistencia del dentado y dejaban en manos de experimentados metalúrgicos la selección del espesor de la capa cementada, quienes generalmente especificaban una profundidad de capa efectiva proporcional al espesor del diente. La anterior práctica y el objetivo de generalizar esta

experiencia ha hecho que muchas de las más reconocidas recomendaciones del espesor de capa efectiva de cementado en los dientes de engranajes cilíndricos y cónicos estén basadas en el módulo del engranaje[1,3,4,5,6]

Un análisis de los valores de espesores efectivos brindados por varias de las más conocidas recomendaciones (véase la figura 2), como las dadas por las firmas MAAG, Gleason, Oerlikon y la Asociación Americana de Fabricantes de Engranaje (AGMA), pueden diferir en valores promedios de $\pm 16\%$. Además, esta el hecho de que estas recomendaciones son inadecuadas para muchos de los engranajes fabricados en la actualidad, donde gran parte de los nuevos diseños hacen uso de las ventajas que reportan en la resistencia del engranaje las correcciones positivas de los flancos y los mayores ángulos de generación en la herramienta, lo que provoca una significativa diferencia de espesor entre dientes con igual módulo pero con desigualdad en el resto de los parámetros geométricos. En algunos casos, pueden ser alcanzados valores diferentes de hasta el 40%, según se observa en la figura 3.

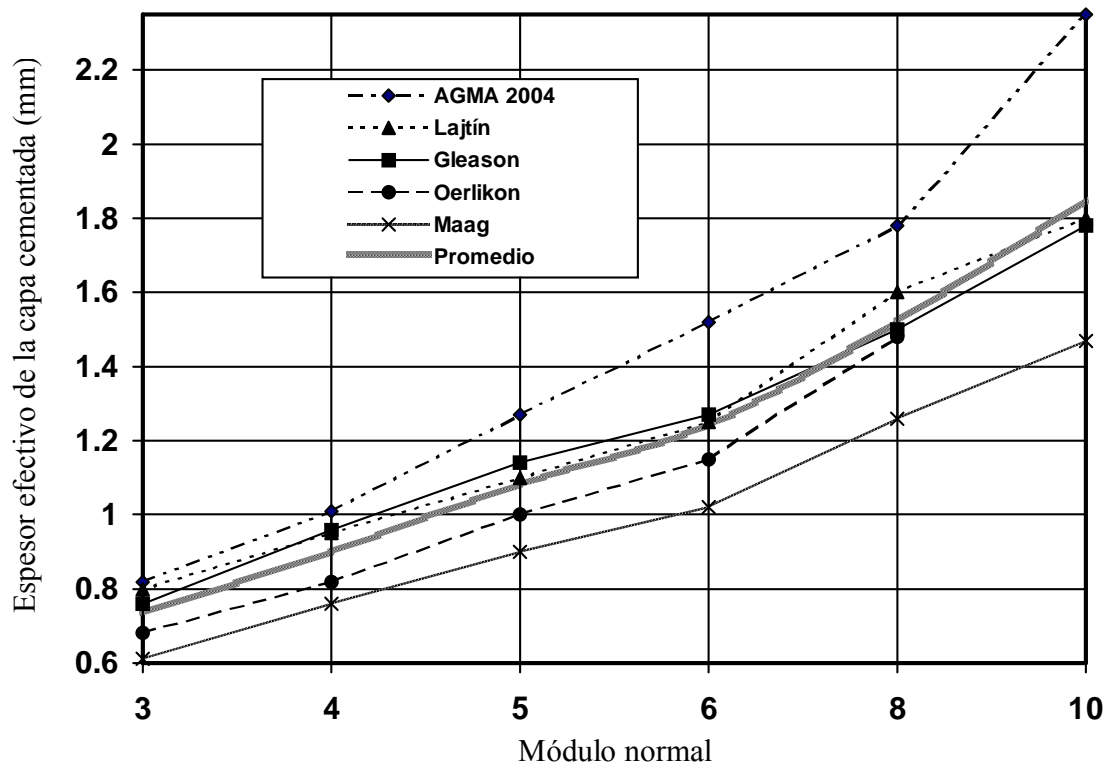


Fig. 2. Recomendaciones del espesor de la capa efectiva de cementado en los dientes de engranajes cilíndricos y cónicos en dependencia del módulo.

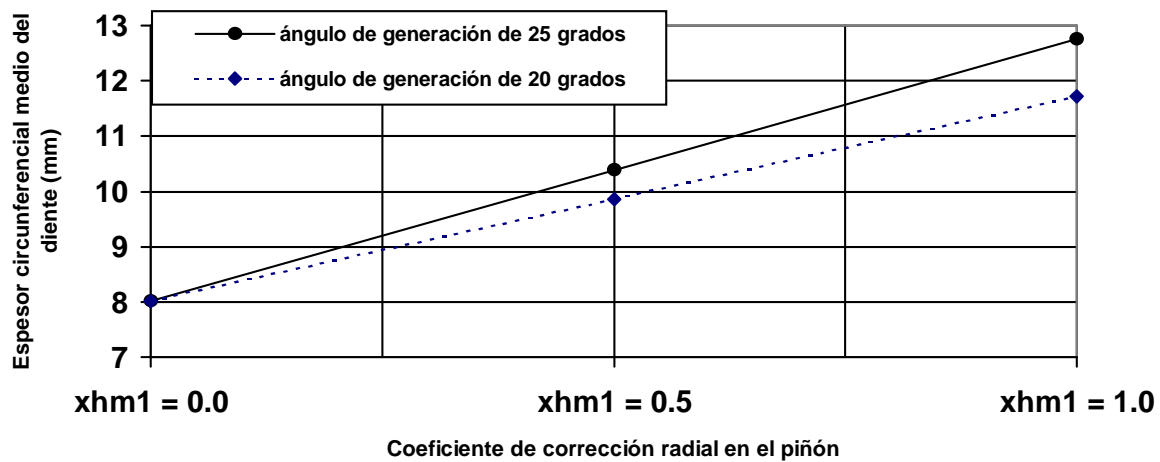


Fig.3. Espesores de dientes para piñones de engranajes cónicos ortogonales con módulo 6, ante diferentes coeficientes de corrección y ángulo de generación de la herramienta.

3. Normalización internacional de la profundidad efectiva de capa endurecida cementada en engranajes cilíndricos

Una revisión de la recién editada norma ISO 6336-5[2] revela un escaso tratamiento del espesor óptimo de capa cementada, limitándose a recomendar el procedimiento declarado en la norma ANSI/AGMA 2001-A88. Con el objetivo de brindar una mejoría a este aspecto, así como a otros, fue creado un grupo de asesores (Ad hoc group #1) adjunto en sus inicios al Grupo de Trabajo #6 de ISO TC60, para posteriormente redirigirse como el grupo de asesores de *Metalurgia* en el nuevo Grupo de Trabajo #14 del Comité Técnico ISO de Engranaje.

La nueva propuesta de cálculo del espesor mínimo efectivo de capa cementada, discutida en el mencionado Grupo de Trabajo a finales de 1997 y presentada por la delegación estadounidense, considera aquellos aspectos geométricos del engranaje que influyen en la localización del esfuerzo cortante máximo bajo la superficie del diente.

$$Eht_{min} = \frac{\sigma_H \cdot d_{w1} \cdot \sin \alpha_{wt}}{U_H \cdot \cos \beta_b} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{mm}) \quad [1]$$

Donde:

Eht_{min} : Espesor mínimo efectivo de capa cementada en la circunferencia de referencia después del acabado superficial (mm).

σ_H : Esfuerzo de contacto actuante (calculado según ISO 6336-2) (MPa).

d_{w1} : Diámetro de la circunferencia primitiva (mm).

α_{wt} : Ángulo de engranaje en el plano transversal.

β_b : Ángulo de la hélice en el cilindro básico.

z_1 y z_2 : Número de dientes en el piñón y la rueda respectivamente.

U_H : Factor por proceso de endurecimiento (MPa).

Para aceros con calidad ML, $U_H = 4.4 \times 10^4$ MPa

Para aceros con calidad MQ o ME, $U_H = 6.6 \times 10^4$ MPa

Un análisis de los parámetros geométricos en el plano transversal de los engranajes cilíndricos nos permite conocer la fórmula [2] la cual considera con influencia en el espesor efectivo mínimo: el esfuerzo de contacto, la calidad del acero y el radio de curvatura reducido entre los dientes engranados en el polo.

$$Eht_{min} = \frac{\sigma_H \cdot \rho_C}{0.5 \cdot U_H} \quad (\text{mm}) \quad [2]$$

De ser considerado $\sigma_H = 1500$ MPa (engranaje a plena capacidad y calidad del material MQ) es obtenida la fórmula [3], coincidente prácticamente con la aceptada por Det Norske Veritas[7] para la condición de espesor efectivo mínimo de capa cementada desde 1978, sin que hayan

detectado desde esa fecha fallo alguno por insuficiencia de profundidad de capa en los engranajes revisados que cumplieran la recomendación declarada[8].

Resultado según propuesta ISO:

$$Eht_{min} = \frac{\rho_C}{22} \quad (\text{mm}) \quad [3]$$

Resultado según Det Norske Veritas:

$$Eht_{min} = \frac{\rho_C}{28} \quad (\text{mm}) \quad [4]$$

Recientemente la delegación estadounidense ha realizado una propuesta de fórmula simplificada[9] para la determinación del espesor mínimo de capa cementada considerando la resistencia a los esfuerzos cortante que surgen bajo la superficie del diente y derivada de la fórmula [1].

$$Eht_{min} = 0.45 \cdot m \cdot \sin \alpha \quad (\text{mm}) \quad [5]$$

Adicionalmente la delegación alemana ha realizado varias propuestas de recomendaciones para evaluar el espesor efectivo óptimo de la capa cementada ante esfuerzos de contacto y de flexión, previendo un deterioro por fatiga del material[10].

-Esfesor efectivo óptimo para garantizar resistencia a la picadura:

$$\text{Para } m \leq 10 \text{ mm: } Eht_{Hopt} = 0.15m \quad (\text{mm}) \quad [6]$$

$$\text{Para } m > 10 \text{ mm: } Eht_{Hopt} = 0.083m + 0.67 \quad (\text{mm}) \quad [7]$$

Esfesor efectivo óptimo para garantizar resistencia a la fractura:

$$Eht_{Fopt} = 0.1 \dots 0.2 \cdot m \quad (\text{mm}) \quad [8]$$

Nótese que un empleo del valor medio del rango provoca una coincidencia exacta con la fórmula [6], demostrando que la propuesta alemana recomienda como espesor efectivo de la capa cementada un 15% del módulo normal del engranaje.

4. Análisis de algunos resultados

Un análisis de los resultados reflejados en la tabla 1 permite observar una coincidencia práctica entre la propuesta alemana (fórmulas 6 y 8) y la fórmula 5 para

valores de ángulo de presión de 20°. Demostrando que para casos de engranajes cilíndricos con módulos menores de 10, con pequeños valores de coeficientes de corrección y un ángulo de presión de 20°, puede ser determinado el espesor efectivo de la capa cementada como un 15% del módulo normal

Tabla 1. Valores de espesor efectivo de capa cementada obtenidos por las dos propuestas a normas internacional.

Condición de cálculo de Eht	Módulo normal del diente.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fórmula [5], $\alpha = 25^\circ$	0,30	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,52	1,71	1,90
Fórmula [5], $\alpha = 20^\circ$	0,30	0,30	0,46	0,62	0,77	0,92	1,08	1,23	1,38	1,54
Fórmula [6]	0,20	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50
Fórmula [8], mínimo	0,20	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Fórmula [8], máximo	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00

La tabla 2 muestra los valores calculados de espesor efectivo mínimo de capa cementada (según la fórmula [5] y los resultados de la evaluación del espesor efectivo óptimo (según fórmulas [6], [7] y [8]) para algunos ejemplos prácticos de engranajes. Nótese como los

valores de espesor mínimo y el rango de valores del espesor efectivo óptimo muestra coherencia en los resultados y permiten concluir una compatibilidad entre la propuesta alemana y estadounidense.

Tabla 2. Ejemplos prácticos de engranajes cilíndricos[11] que permiten comparar los valores calculados de espesor efectivo mínimo Eht_{min} (propuesta estadounidense) y los rangos recomendados de espesor efectivo óptimo Eht_{Hopt} y Eht_{Fopt} (propuesta alemana).

Ejemplos	1 (engranaje de laboratorio)	2 (engranaje industrial)	3 (engranaje industrial)	4 (engranaje de alta velocidad)	5 (engranaje de alta velocidad)
z1	17	19	16	22	51
z2	18	61	59	328	61
m (mm)	5	5,5	9	3	14
dw1 (mm)	89	107	150	68	730
a _w (mm)	91,5	225	350	544	800
α_{wt} (°)	26,02	21,36	23,30	21,00	20,36
β (°)	0	10,0	10,0	14,7	11,5
Material	Calidad MQ	Calidad MQ	Calidad MQ	Calidad MQ	Calidad MQ
σ_H (MPa)	1460	1148	1120	960	660
Eht _{min} (mm)	0,444	0,524	0,802	0,342	1,408
Eht _{Hopt} (mm)	0,750	0,825	1,350	0,450	2,100
Eht _{Fopt} (mm)	0,50...1,00	0,55...1,10	0,90...1,80	0,30...0,60	1,40...2,80

5. Conclusiones

1-Para engranajes con significativos coeficientes de corrección o ángulos de generación en la herramienta diferentes de 20° son insuficientes las recomendaciones basadas en el módulo del diente para determinar el espesor efectivo de la capa cementada.

2-En casos de engranajes cilíndricos con módulos menores de 10, pequeños valores de coeficientes de corrección y un ángulo de presión de 20° , puede ser determinado el espesor efectivo de la capa cementada como un 15% del módulo normal del engranaje.

3-El espesor efectivo mínimo de la capa cementada según la fórmula [1] y el rango de valores para el espesor efectivo óptimo según las fórmulas [6], [7] y [8] muestran coherencia y permiten concluir una compatibilidad no excluyente entre la propuesta alemana y estadounidense.

Bibliografía

1. Pedersen R., Rice, S.L., Case Crushing of Carburized and Hardened Gears. ISO/TC60/WG6 Doc. 718 (Dec. 1997)
2. ISO Standard 6336-96, Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears. Strength and Quality of Materials.1996

3. ANSI/AGMA Standard 2004-B89, Gear Materials and Heat Treatment Manual, Virginia, 1992.
4. Lajtín, Yu., Arzamásov, Tratamiento Químico - Térmico de los Metales. Edit. MIR, Moscú, 1987
5. Skip Jones, L., Selection of Materials and Compatible Heat Treatments for Gearing. SME Paper CM81-998, 1981
6. Oerlikon-Bührle Ltd., Oerlikon Gears. Hints for their Manufacture, Zurich, 1988
7. Maag Gear Company Ltd., MAAG Gear Book, Zurich, 1990
8. Det Norske Veritas, Classification Notes N° 41.2, Calculation of Gear Rating for Marine Transmissions. 1993
9. ISO, Norwegian Comments to Case Depth, Documento N° 593 ISO/TC60/WG6, Febrero 1997.
10. ISO, Proposal by USA Delegation to WG-14, Documento N° 718 ISO/TC60/WG6, Diciembre 1997.
11. Höhn, B.R., German Comments on Case Depth of Carburized and Hardened Gears, Documento N° 602 rev. ISO/TC60/WG6, Febrero 1995.

New orientations to calculate the effective depth of the layer hardened in engagements of cemented steel

Abstract.

Inconvenience of the classics and known recommendations to decide the effective case thickness toughened in the cemented teeth of cylindrical and bevel gears are exposed and discussed. Furthermore, the recent work accomplished by ISO TC60/WG 14 in the normalization of the cemented effective depth are exposed taking as base the German and American proposals. It is verified through 5 examples the applicability of the current state of the effective depth recommendations of cap cemented in the gears without fragility risk and capable of guaranteeing the necessary mechanical resistance in the flanks of the teeth before the damage by case crushing or pitting.

Key words: gears case hardened, effective depth and ISO Standards.

I Conferencia de Diseño Mecánico de Componentes y Sistemas



Septiembre 12 - 15, 2000, La Habana, Cuba

TEMAS PRINCIPALES

Diseño por Simulación y Optimización, Mecánica del Sólido, Cinemática y Dinámica de las Máquinas, Ingeniería para la Industria y Elementos de Máquinas.

Para enviar resúmenes o solicitar información adicional

Comité Organizador CCIM'2000
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Facultad de Ingeniería Mecánica
Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad de La Habana, Cuba
 Teléfono: (537) 20 2267 Fax: (537) 27 1208 E-mail: ccim@mecanica.ispjae.edu.cu