

TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Oxidación superficial

la superficie es la zona de una pieza que va a sufrir las acciones exteriores, los rozamientos, corrosión, ... por lo que generalmente requiere de unos tratamientos especiales: pero sólo en la superficie, el núcleo no se toca.

Al contacto con el oxígeno, el Fe y C reaccionan originando:

- Capa de óxido, que se desprende: descascarilla
- Pérdida de carbono en la superficie - descarburación: el carbono al oxidarse produce CO o CO_2 , que son gases y por tanto se pierden; así, la superficie va reduciendo su contenido en carbono poco a poco, pero también lo hace el núcleo, pues parte de su C se mueve a la superficie para compensar esa falta.

Con la descarburación hay que tener mucho ojo, pues al tener menor contenido en carbono, la martensita obtenida, si se temple, será mucho menos dura (puede que incluso no lleque a templear!).

Además, este proceso se acelera al aumentar la temperatura; hay que eliminar esa capa, aunque puede ser complicado, si por ejemplo la pieza está templeada.

la capa de óxido puede eliminarse por chomeado con arena o decapado con ácido, aunque este último método induce fragilidad por hidrógeno.

la descarburación se evita con atmósferas protectoras (ricas en CO que van reponiendo el carbono que se pierde) o por calentamiento en baños de sales

L Tratamientos químicos

• Tratamientos sin cambios de composición: acritud superficial

Se produce deformación plástica en la superficie por impacto: antiguamente se hacía a martillazos, ahora mediante un martilleado de perdigones, que al producir menores irregularidades superficiales presenta un mejor comportamiento a fatiga (efecto doble)

Produce acritud superficial con:

- Aumento de dureza en la superficie
- Pérdida de plasticidad sólo en la superficie
- Tensiones residuales de compresión (buena)
- Mejora el acabado superficial

L Tratamientos mecánicos

● Temple superficial

Es la austenización de una capa superficial de la pieza (de 1 a 6 mm) seguida de temple. Consiste en aportar mucho calor en poco tiempo para austenizar sólo la superficie, no dando tiempo a que el núcleo aumente su temperatura. Tiene, además, una ventaja añadida en el temple, pues aparte de tener una velocidad de enfriamiento mayor de la que le correspondiera (por desprender calor hacia el medio y hacia el núcleo, que está frío) la superficie queda con tensiones de compresión.

Para dar ese calentamiento rápido:

- Calentamiento a la llama, que se consigue con un soplete; su intensidad y tiempo de aplicación regulan la temperatura alcanzada y la profundidad austenizada. Puede hacerse un procedimiento continuo (llama y chorro de líquido desplazándose) o intermitente de llama y líquido de temple.
- Calentamiento por inducción: se consigue por calor generado en la pieza por pérdidas de histéresis magnética o por corrientes de inducción (Foucault). Se regula con la potencia, frecuencia y tiempo.

Como el tiempo de permanencia a alta temperatura es pequeño, el grano no crece: se forma austenita de grano muy fino y una martensita con una dureza más alta de lo que le correspondiera, como hemos dicho: "superdureza".

● Modificación de la superficie por láser o haz de electrones.

El calentamiento también puede obtenerse por láser o haz de electrones. La capa austenizada es muy delgada y se calienta muy rápidamente. También, el enfriamiento es muy rápido por conducción del calor a la pieza, obteniendo:

- Una capa delgada
- Martensita muy fina y muy dura
- Casi exenta de tensiones
- Alta resistencia al desgaste.

Si el calentamiento prosigue, se llega a la fusión de una capa superficial, con enfriamientos de solidificación tan rápidos que pueden obtenerse microestructuras de no equilibrio, fases metaestables, soluciones sobresaturadas e incluso vidrios metálicos (amorfos), con comportamientos muy diferentes a los esperados.

La fusión superficial se emplea para modificar su composición por adición previa o proyección simultánea de aleantes: p.e., con carburos y boruros se llega en aceros muy aleados (de herramientas), a durezas del orden de 2100 HV (la dureza máxima de un acero normal está en torno a 800 HV)

calentamiento a la llama. Temple superficial

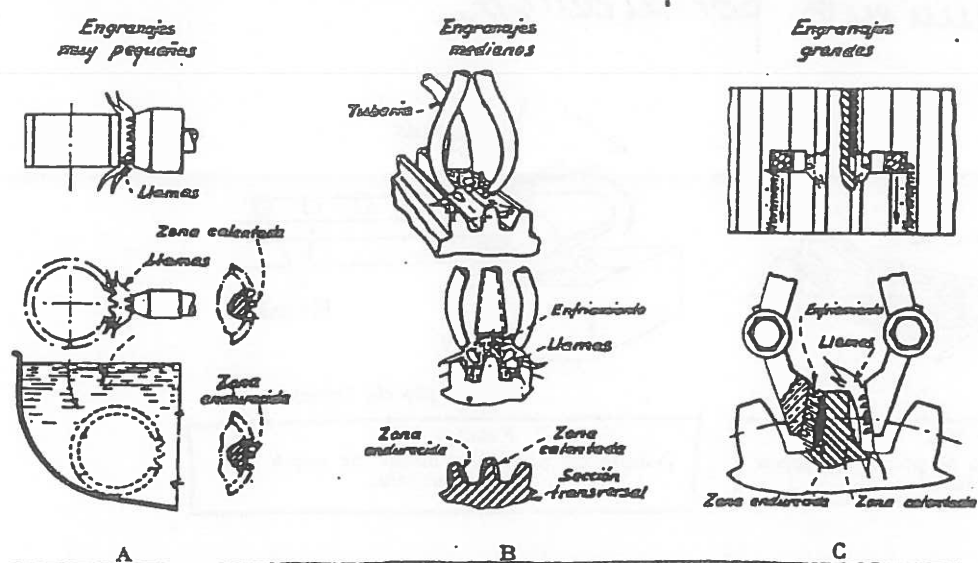


FIGURA 384
Procedimientos usados para el temple de engranajes por llama oxiacetilénica.

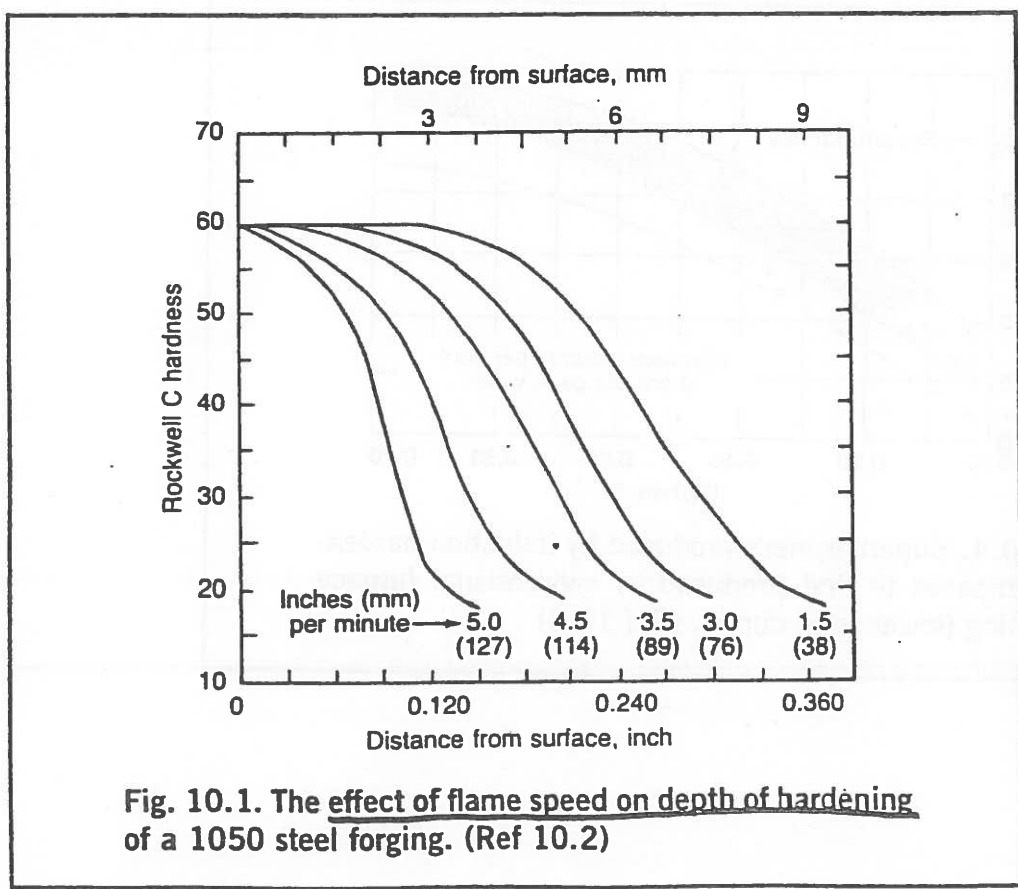


Fig. 10.1. The effect of flame speed on depth of hardening of a 1050 steel forging. (Ref 10.2)

Calentamiento por inducción.

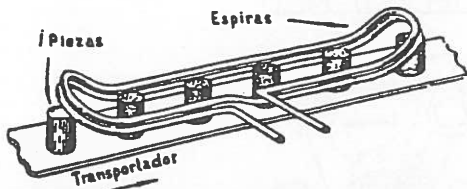


FIGURA 392
Calentamiento continuo de piezas de acero por alta frecuencia.

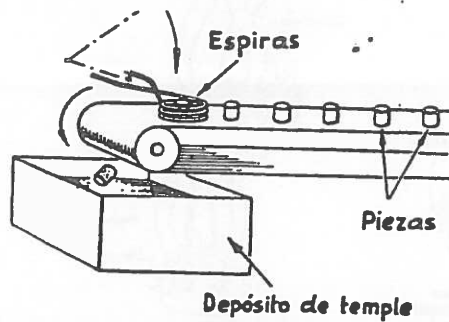


FIGURA 393
Temple de pequeñas piezas de acero por alta frecuencia.

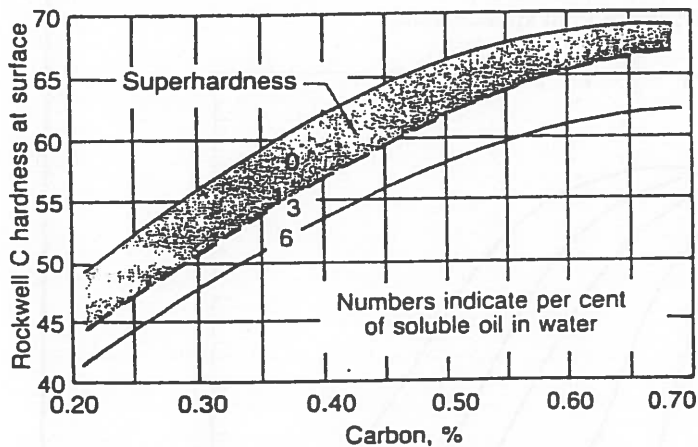


Fig. 10.4. Superhardness produced by induction hardening compared to that produced by conventional furnace hardening (lower solid curve). (Ref 10.3)

● Tratamientos con cambios de cuerpos: implantación iónica.

Se integran átomos en la superficie por proyección de un haz de iones acelerados sobre la superficie fría; se emplean sobre todo el Nitrógeno y el Titanio.

dos átomos entran en la red, distorsionándola mucho y creando tantos defectos que la estructura es casi amorfa: origina muy altas durezas.

No hay difusión, y la capa afectada es muy fina ($\approx 0.25 \mu\text{m}$): se emplea por ejemplo en cuchillas y herramientas de corte.

● Deposición en fase vapor

la deposición física (PVD) genera capas de átomos o moléculas depositadas por procedimientos físicos: evaporación en vacío, proyección por plasma (sputtering) o plaquado con iones evaporados acelerados (se obtiene una capa de estructura columnar de $1 \text{ a } 6 \mu\text{m}$)

Ejemplos: TiN , $(\text{TiAl})\text{N}$ y ZrN en aceros — 2500 HV

la deposición química (CVD) genera capas por reacción química en la superficie, en caliente o en frío.

Ejemplos: Al_2O_3 , ZrO_2 , TiC en aceros — 1800 HV

● Inmersión en sales fundidas (TD)

Se provocan reacciones (químicas) en la superficie por inmersión en sales fundidas de bórax con adición de elementos formadores de carburos: V, Ti, Cr, Nb

Con el carburo del acero se formarán capas de carburos de unas $5\mu\text{m}$ — 3000 HV

● Cementación

La cementación es el proceso por el cual se aumenta el contenido en carbono de la superficie de un acero del orden de $0.2\% \text{ C}$; lo normal es conseguir contenidos en superficie de $0.8 - 1\%$ (hipereutectoide). Se realiza calentando el acero en zona austenítica ($850 - 950^\circ\text{C}$), en una atmósfera rica en carbono, pero hay que tener mucho cuidado con el tiempo de permanencia a esa temperatura (que se elige para facilitar la difusión), pues se corre el riesgo de aumentar mucho el tamaño de grano. En función del medio:

- Cementación sólida: se introduce el acero en una caja con grafito cerrada herméticamente, se mete al horno y se deja unas horas. Se forma CO y CO_2 ; el primero se disocia y se introduce el C , pero el segundo descarbura: por eso cerramos herméticamente, para que no tenga contacto con la atmósfera, con el oxígeno.

IMPLANTACIÓN IÓNICA

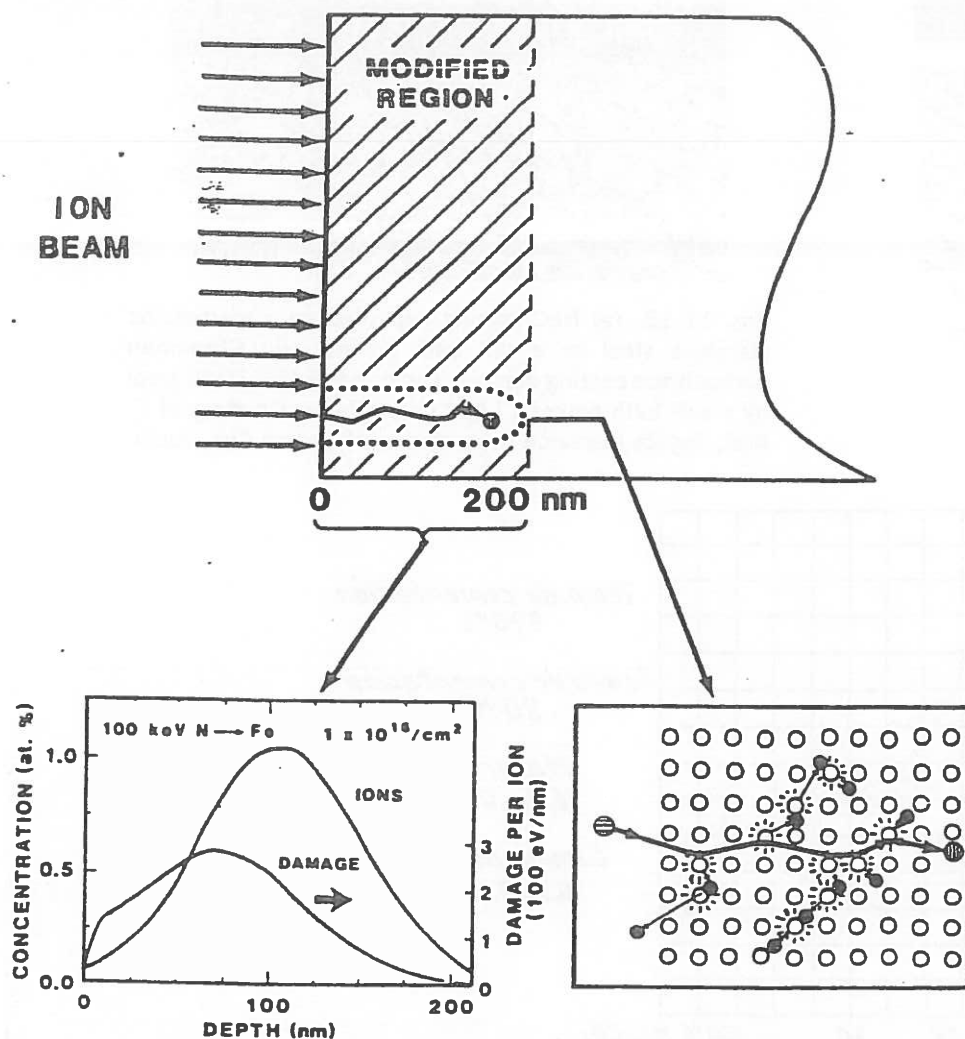


Fig. 11.4. Schematic illustration of implantation of iron with nitrogen ions (top). N and damage profiles (lower left). Cascade region of high defect density generation (lower right). (Ref 11.25)

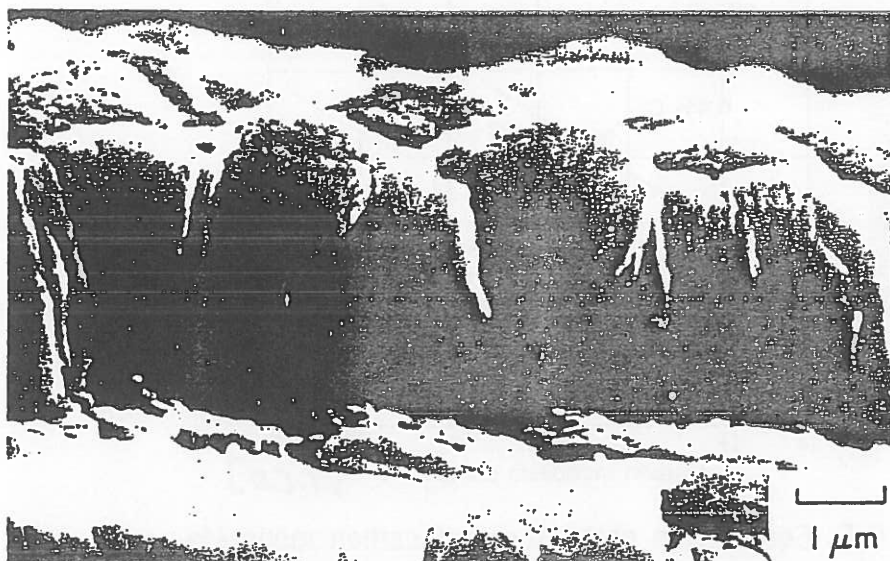


Fig. 11.10. $(\text{Ti}_{33}\text{Al}_{17})\text{N}$ coating deposited by triode ion plating at low substrate current density. Scanning electron micrograph. Courtesy of A.S. Korhonen, Helsinki University of Technology. (Ref 11.39, 11.40)

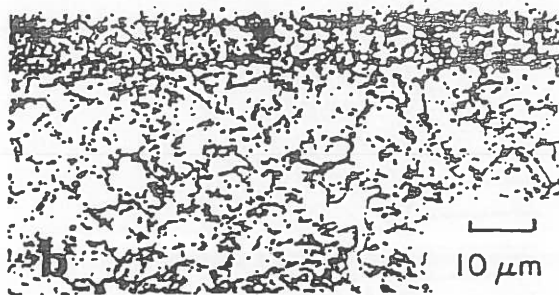
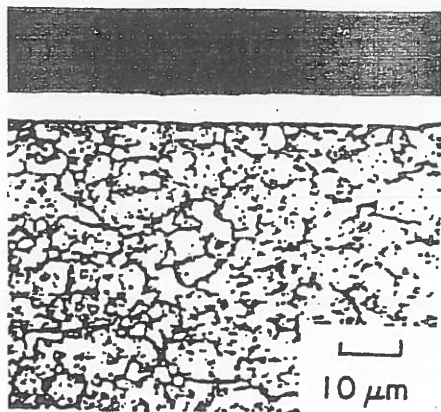


Fig. 11.13. (a) NbC coating deposited on a martensitic stainless steel by a salt bath process. (b) Chromium carbonitride coating deposited on nitrided AISI 1045 steel by a salt bath process. Light micrographs. Courtesy of T. Arai, Toyota Research Laboratories, Nagakute-Cho, Aichi

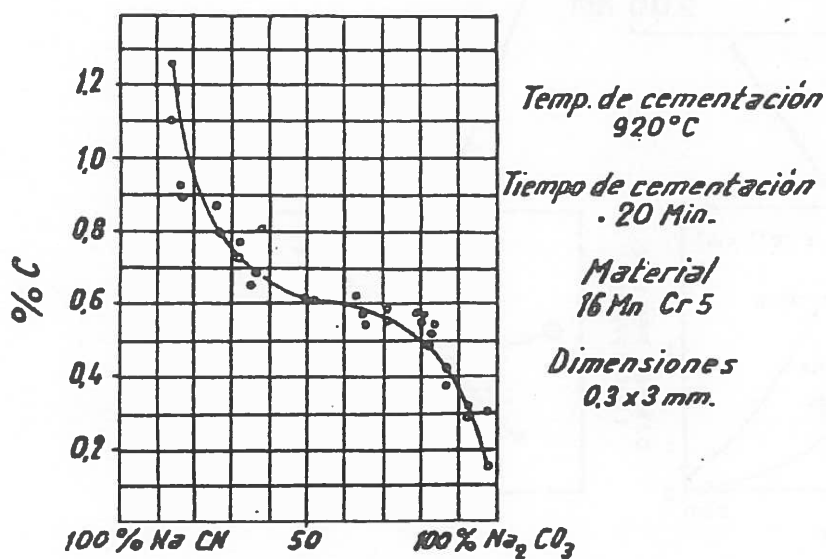


Fig. 4.

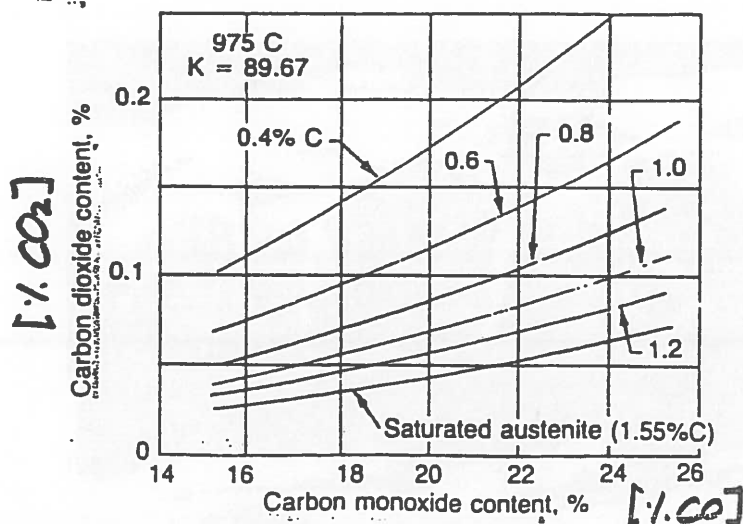


Fig. 10.5. Equilibrium percentages of carbon monoxide and carbon dioxide required to maintain various carbon concentrations at 975 °C (1790 °F) in plain carbon and certain low-alloy steels. (Ref 10.10)

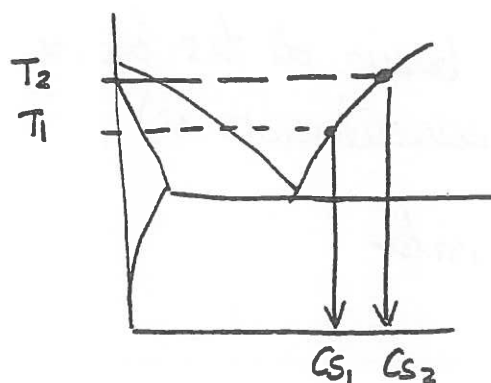
- Cementación líquida (en sales fundidas: cianuros). Son molibdas más activas pero muy peligrosas por su elevada toxicidad [1 mg absorbido por la piel \rightarrow 10s de vida !!]
 L No se usa.

- Cementación gaseosa, en atmósferas de combustión incompleta de gas natural u otros gases de hidrocarburos (es la más utilizada). La combustión incompleta es para que se forme CO en lugar de CO_2 .

Denominamos:

T_c = título o potencial en carbono: es el % C que puede introducir el medio cementante en el acero

C_s = carbono de saturación: es el % C que puede disolver la austenita a la temperatura del proceso



Si $C_s < T_c$ se formará cementita, que no es deseable \rightarrow busco $T_c < C_s$

la expresión que rige el proceso de cementación gaseosa es

$$T_c = \frac{1}{k \cdot f_c} \cdot \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}$$

P = presiones parciales de CO o de CO₂

$$\log k = 9.1148 - \frac{8918}{T}$$

f_c = coeficiente de actividad = $f(T, \text{elementos aleación})$

A_c = actividad en carbono : velocidad con la que el cementante introduce carbono en la superficie del acero.

La penetración de carbono en el acero se produce por difusión, y la velocidad de difusión, esto es, la velocidad con la que el carbono puede entrar, es

$$D \propto \exp(-Q/RT)$$

Nos interesa que nuestro acero tenga buena difusión, y esto disminuye mucho (se inhibe la cementación si)

$$\left\{ \begin{array}{l} \% Cr > 0.7 \Rightarrow \text{se limita a este valor} \\ \% Mo > 1 \\ \text{El grano es muy fino: } T_9 \gg 10 \end{array} \right.$$

Salvo estos casos, la difusión es un valor que se mantiene más o menos constante.

- Si $A_c > D$, el contenido en carbono en la superficie es, desde un momento inicial, igual a T_c . Se tienen gradientes grandes de carbono en la superficie, sin embargo, estos gradientes son mucho menores cuando $A_c < D$. Ver fig 10.6 - 10.7

Las curvas de cementación se controlan con los parámetros A_c , D , T_c y C_s y el tiempo de cementación, estableciéndose cuatro tipos de curvas:

- | | | |
|---|---------|--|
| { | Tipo A: | $A_c > D$ — gradientes grandes de %C
$T_c < C_s$ — tempo a disuelto en la austenita |
| | Tipo B: | $A_c < D$
$T_c < C_s$ |
| | Tipo C: | $A_c > D$
$T_c > C_s$ — formación cementita |
| | Tipo D: | $A_c < D$
$T_c > C_s$ — " " |

El espesor de la capa cementada es una función parabólica del tiempo, que me indica que a partir de un cierto valor t , ya no se gana mucho:

$$x = k \cdot \sqrt{t} \quad \text{donde } k = f(T)$$

Una duración normal del proceso es de unas 8 horas.

- Tratamientos térmicos.

Terminado el proceso de cementación, puede dejarse un tiempo a esa temperatura para mejorar la difusión, pero luego tendremos que enfriar y dar algún tratamiento, como el temple.

• Temple directo: la pieza se temple desde la temperatura de cementación; con ello:

- Quedará mucha austenita retenida (20-30%) que aumentará con elementos como el Ni que bajan M_s
- Habrá alta agrietabilidad con formación de microgrietas (puede disminuir con un ligero enfriamiento previo)

• Temple de recalentamiento: tras el primer temple, se calienta por encima de A_1 (austenización incompleta) y se temple, de forma que:

- Afina el grano y disminuye la agrietabilidad
- Disminuye la templeabilidad
- Puede formar redes de carburos (aumenta con el %C de la capa y con elementos formadores de carburos)

M/194

PERFILES DE
FUNDACIÓN

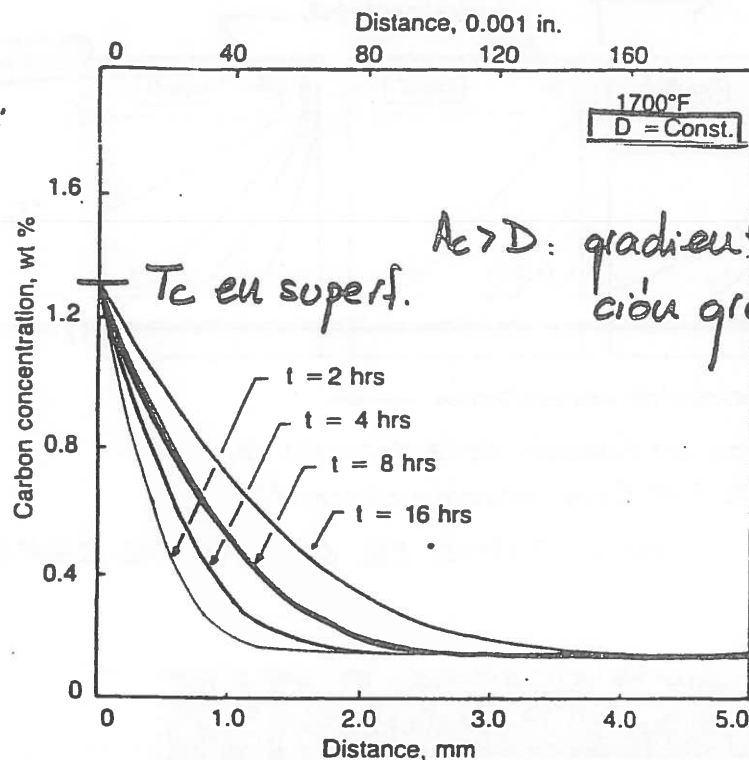


Fig. 10.6. Carbon concentration in an Fe-C alloy as a function of distance calculated for various carburizing times at 925 °C (1700 °F), assuming the diffusion coefficient is independent of composition. (Ref 10.11)

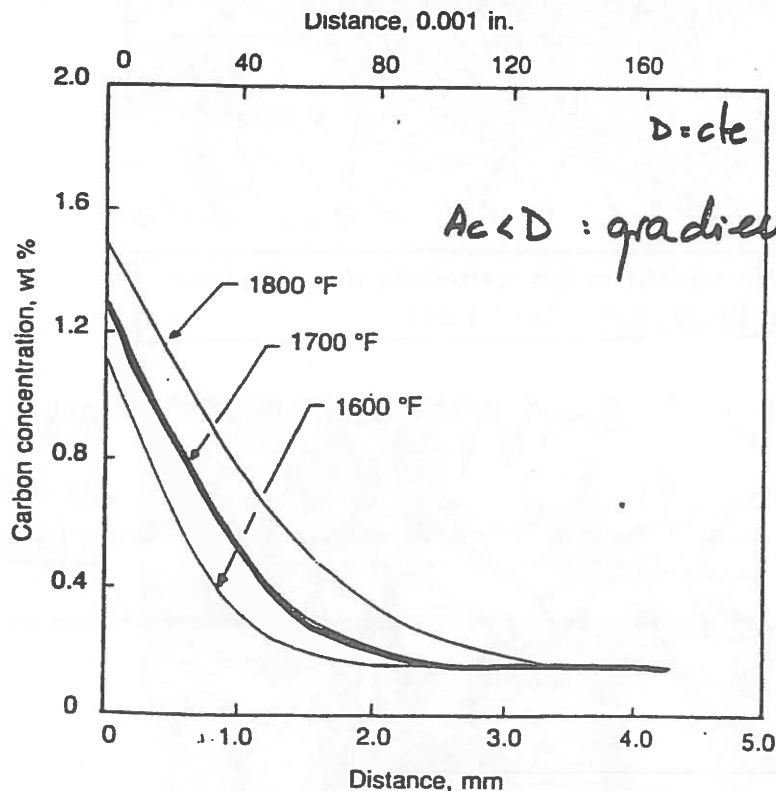
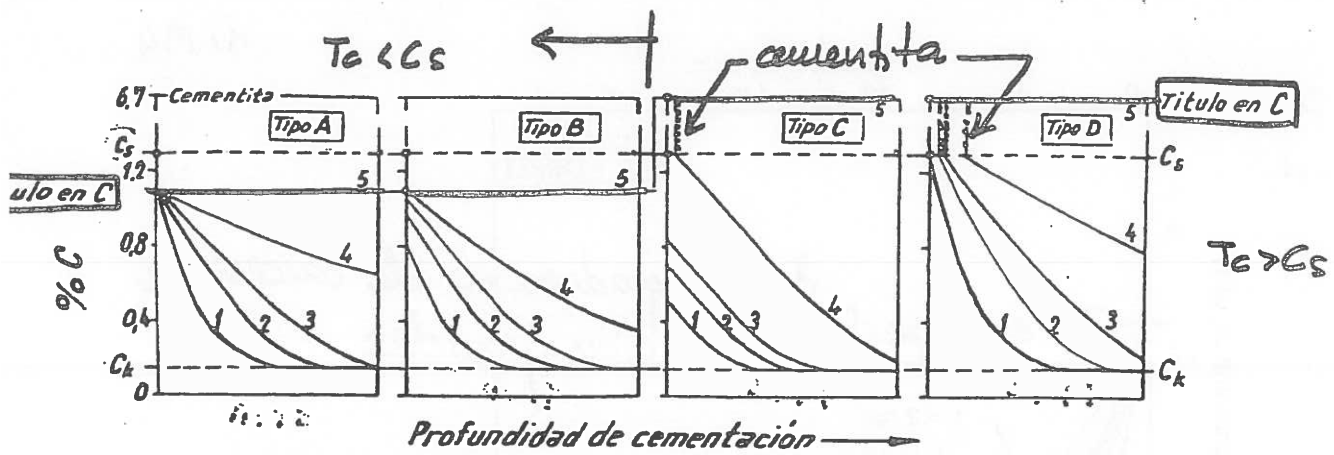


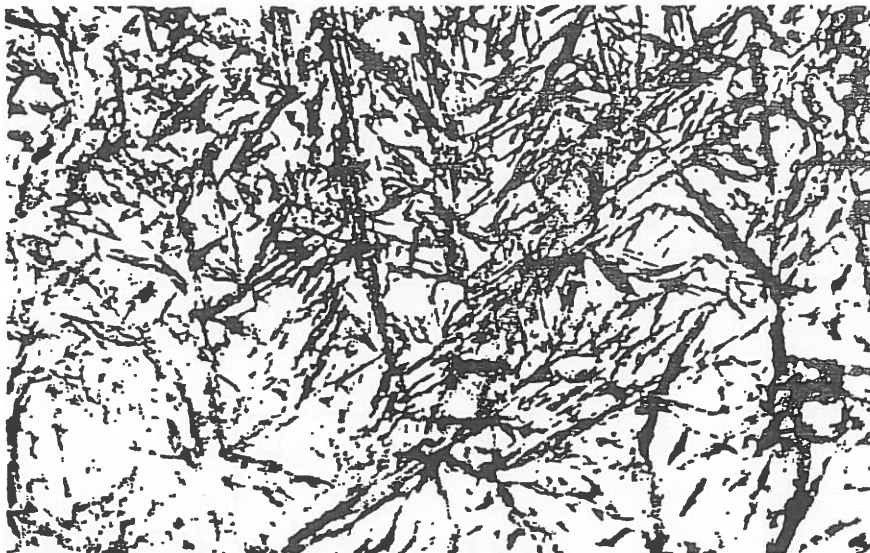
Fig. 10.7. Carbon concentration in an Fe-C alloy as a function of distance calculated for various temperatures for 8-h carburizing, assuming the diffusion coefficient is independent of composition. (Ref 10.11)



Curvas de cementación en función de la duración del tratamiento: $1 < 2 < 3 \ll 4 \ll 5 \equiv$ Cementación cementítica.

Fig. 7. TIPOS DE CURVAS DE CEMENTACIÓN.

Tipos de microgrietas:



Grietas

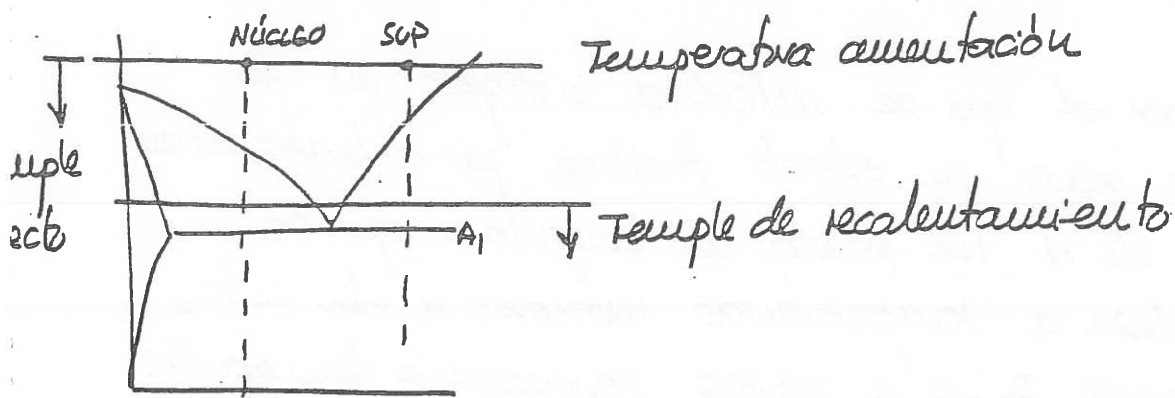
Fig. 10.13. Microcracks in the martensite of a carburized coarse-grained 8620 steel. (Ref 10.24)



Alto contenido en austenita retenida

Fig. 10.11. High austenite content in corner of an 8620 steel carburized and diffused at 1050 °C (1920 °F) and cooled to 845 °C (1550 °F) before oil quenching. (Ref 10.22)

M/195



No se dan revenidos, luego el núcleo ha de ser de bajo contenido en carbono para tener algo de plasticidad y tenacidad. Debe elegirse entre los diferentes temple según la aplicación; uno de los problemas del temple de recalentamiento es la formación de redes de cementita (Fig 10.12) que dan mucha fragilidad, aunque podemos recurrir a globulizantes (Fig 10.9).

El problema de la agrietabilidad, muy acusado en el temple directo, depende del gradiente térmico y la composición en carbono, y en nuestro caso estamos tratando con un acero con dos zonas de diferente %C:

} superficie - mucho %C - aumenta tamaño
 } núcleo - menos %C - aumenta menos el tamaño

en la superficie se generan tensiones de compresión, que mejoran el comportamiento a fatiga, tanto mayores cuanto mayor sea la diferencia en %C.

● Nitruración

- Es el proceso por el que se introduce nitrógeno en la superficie de un acero en estado ferrítico, por calentamiento en atmósfera de N (se provoca con amoníaco, que se disocia). Se realiza a temperaturas inferiores a la eutectoide del diagrama Fe-N, a piezas previamente templadas y revenidas a temperaturas más altas que esa.
- El proceso dura de 10 a 100 horas y se producen capas de espesor generalmente de menos de 0.5 mm.
- Se forman nitruros de hierro y de los elementos de aleación, así como zonas en la red en la que se concentran átomos sustitucionales de aleantes e intersticiales de nitrógeno.
- Los precipitados son coherentes y finamente dispersos.
- El endurecimiento producido por diferentes aleantes es distinto: Al, V, Cr y Mo.
- Se genera una capa superficial blanca de Fe_4N que es muy frágil y ha de eliminarse.
- Ventajas respecto a la cementación:
 - se producen menores tensiones y distorsiones
 - la capa nitrurada es de mayor dureza
 - la capa puede calentarse sin perder dureza
- Puede darse después de un tratamiento de oxidación que mejora el comportamiento a desgaste.

TEMPLE DE RECALENTAMIENTO.

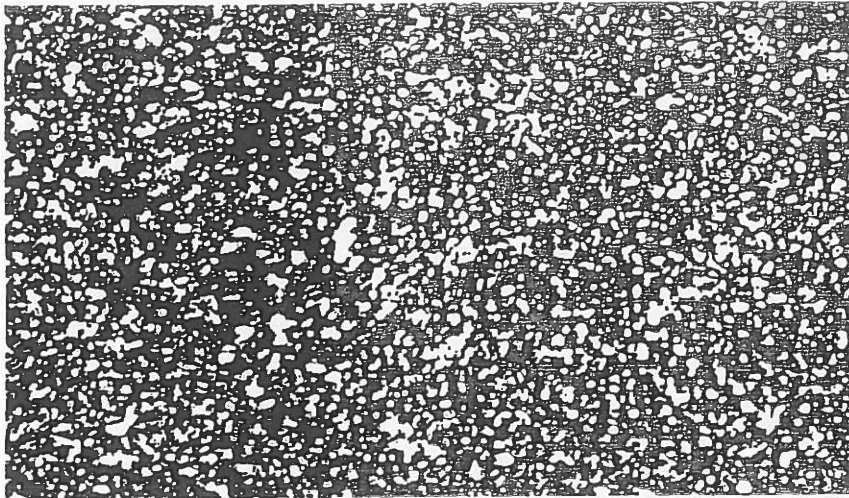


Fig. 10.9. Microstructure adjacent to surface of 8620 steel carburized at 1050 °C (1920 °F), oil quenched from 845 °C (1550 °F), and reheated to 845 °C (1550 °F). Magnification, 1000×. (Ref 10.16)

red de cementita formada en un temple de recalentamiento.
carb. solución: GLOBULIZACIÓN

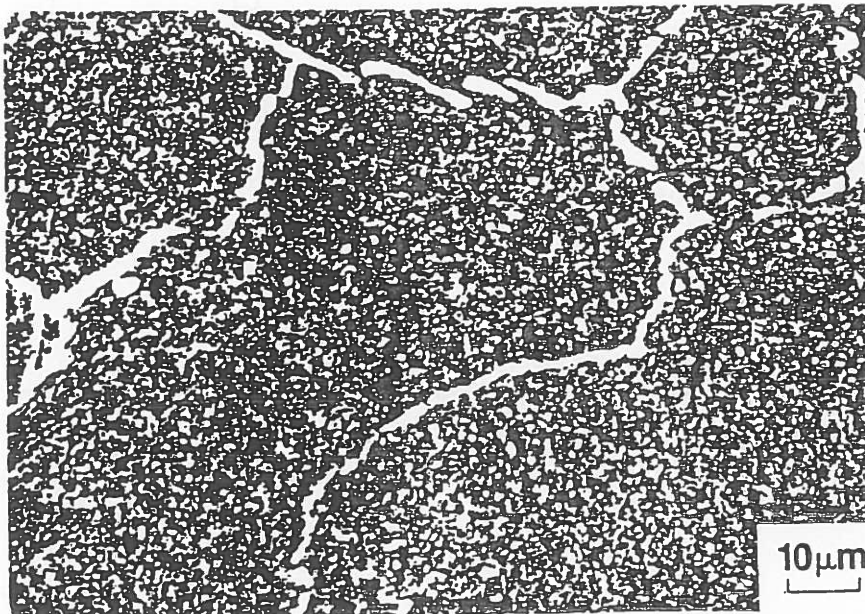
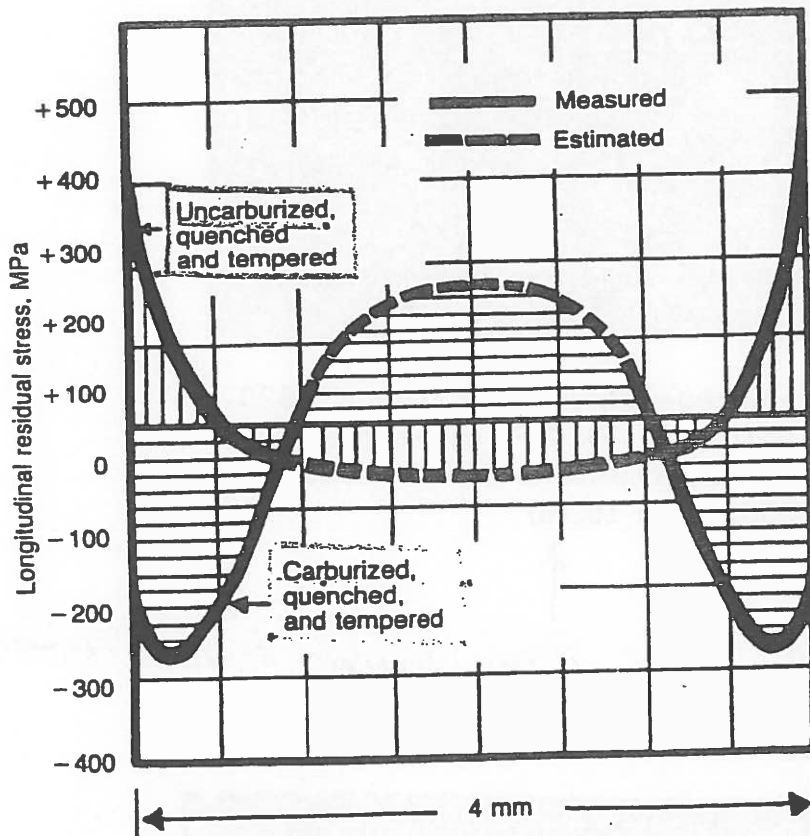


Fig. 10.12. Cementite network in corner of an EX 24 specimen carburized at 1050 °C (1920 °F), oil quenched, and reheated to 845 °C (1550 °F). (Ref 10.16)

Figure 10.17. Residual stress as a function of distance through the thickness of carburized and uncarburized chromium-carbon steel specimens.



Composition of base steel:

0.26 C, 1.08 Mn, 0.93 Cr, 0.15 Ni, 0.3 Mo, 0.06 Ti, 0.024 S, 0.013P

Heat treatments:

Gas carburize 930-940 °C, quench from 840-850 °C, temper 1 h at 180-200 °C

Specimen dimensions:

110 mm long, 15 mm wide, 4 mm thick

Fig. 10.17. Residual stress as a function of distance through the thickness of carburized and uncarburized chromium-carbon steel specimens. (Ref 10.34)

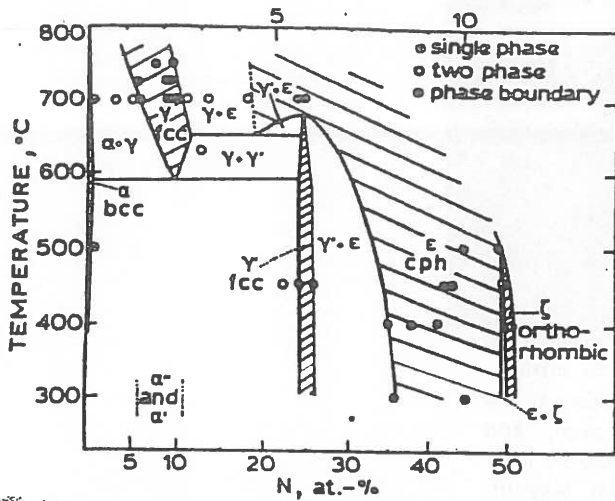
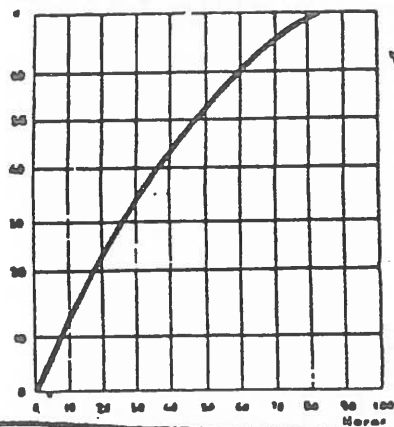


Fig. 10.22. Iron-nitrogen phase diagram. (Ref 10.42)

Diagrama Fe-N

No debemos superar los 600°C
pues se forma la braunita
(como la cementita en Fe-C:
muy dura y muy frágil - No!)

1
100 de mm.



espesor = \sqrt{t}

FIGURA 378

Espeor de capa nitrurada, que se obtiene al nitrurar a 500° durante periodos variables de tiempo.

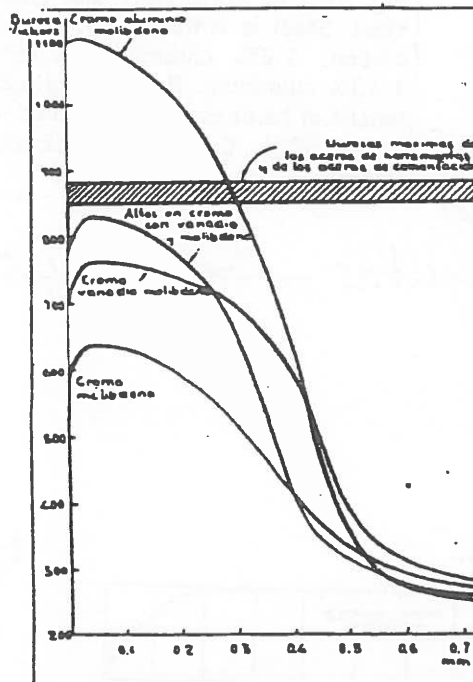
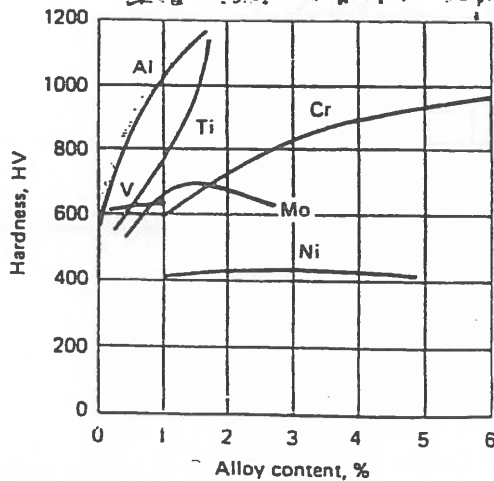
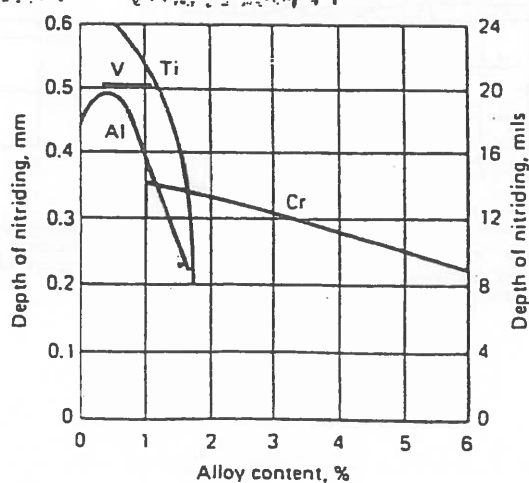


FIGURA 366

Durezas que se obtienen después de la nitruración de diferentes tipos de aceros.



(a)



(b)

Fig 7 Influence of alloying elements on (a) hardness after nitriding (base alloy, 0.35% C, 0.30% Si, 0.70% Mn) and (b) depth of nitriding measured at 400 HV (nitriding for 8 h at 520 °C, or 970 °F). Source: Ref 7

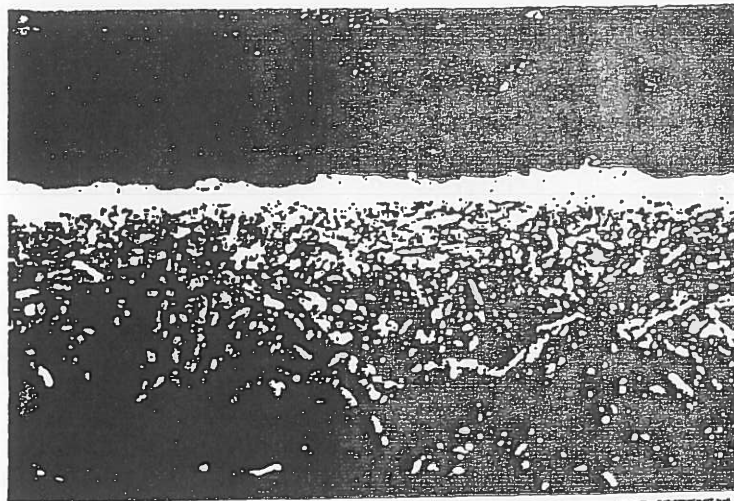


Fig. 10.24. White layer and diffusion zone in nitrided steel. Steel is Nitralloy 135 Modified containing 0.4% carbon, 1.6% chromium, 0.35% molybdenum, and 1.13% aluminum. Base microstructure is tempered martensite of hardness R_c 30. Etched in 1.5% nital. Magnification, 500 \times . Courtesy of D. Stratford, Sundstrand Corp., Denver

pa superficie
nitruída que
muy dura y
que permite el

de herramientas \rightarrow herramientas que resisten la fatiga (base)

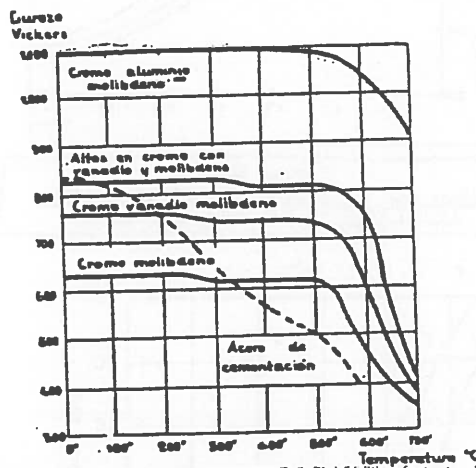


FIGURA 367-a

Dureza de los aceros nitruados después de permanecer una hora a diversas temperaturas. Los ensayos se realizan a la temperatura ambiente.

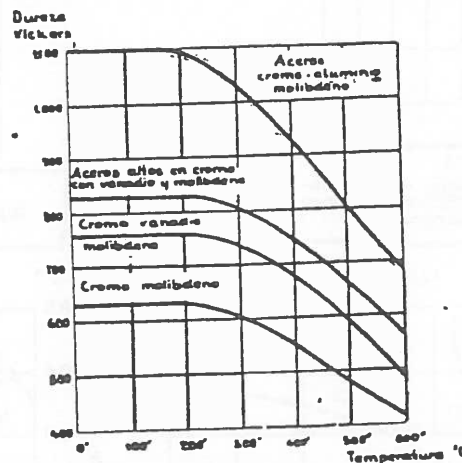


FIGURA 367-b

Dureza a elevada temperatura de los aceros nitruados. Los ensayos se realizan a alta temperatura.

• Carbonitricación

- A la atmósfera cementante se le añade amoníaco: el proceso se realiza a unos 700°C , en zona austenítica.
- Puede hacerse en líquido: cianuración.
- El nitrógeno inhibe la difusión de carbono, formando capas de $0.1 - 0.6 \text{ mm}$.
- Por temple se obtiene martensita con nitruro ϵ que la endurece y da buen comportamiento tribológico.
- El N aumenta la templabilidad y hace aumentar la austenita retenida.

• Procesos con plasma

- La nitruración y cementación pueden realizarse generando plasma alrededor de la pieza, de forma que los procesos se realizan más rápidamente.

• Otros tratamientos

- Recubrimientos electrolíticos: niquelado, cromado, cromado duro, poroso, etc.
- Aluminizado: por difusión de Al a 900°C para mejorar el comportamiento a oxidación en caliente
- Siliciado: por difusión de Si a 1000°C para mejorar el comportamiento a corrosión y a desgaste
- Proyección térmica (metalización) de diversos recubrimientos

- Carburizado: por difusión de C a $400-1000^{\circ}\text{C}$, produce una capa muy dura, para mejorar el comportamiento a desgaste.