

Influencia sobre los tratamientos térmicos del contenido de aluminio de aceros no aleados^(*)

L. Carreras^(*)

Resumen El objetivo de este trabajo es determinar el intervalo óptimo de contenidos de aluminio en aceros no aleados para los que se consiguen las propiedades mecánicas óptimas mediante tratamientos térmicos de superficie. Se estudian diferentes coladas de acero en las que varía el contenido de aluminio y las temperaturas de tratamiento. Se evalúa la importancia de otros factores tales como el contenido de nitrógeno y la homogeneidad en la distribución de partículas endurecedoras. Se llega a la conclusión de que los aceros no aleados destinados a tratamientos térmicos no deben tener un contenido de aluminio superior al 0,02 %.

Palabras clave: **Tratamientos térmicos superficiales. Aceros no aleados. Contenido de aluminio.**

Influence of the aluminium content of plain steels on heat treatments

Abstract The main purpose of this article is to determine the optimal level of aluminum content in plain steels to have the optimal mechanical properties by means of surface heat treatments. Various plain steels with different aluminium content have been studied. The importance of treatment temperature is analyzed. The influence of other factors, like nitrogen content or the homogeneous distribution of particles, is evaluated. It is concluded that the aluminum composition of plain steels that are subjected to heat treatments should not exceed 0.02 %.

Keywords: **Surface heat treatments. Plain steels. Aluminum content.**

1. INTRODUCCION

Es frecuente la adición de porcentajes de aluminio entre 0,02 y 0,08 % a aceros al carbono para afinar el tamaño de grano; por ejemplo, para obtener un número ASTM superior a 7 (1 y 2). Es habitual la utilización de estos aceros en la elaboración de piezas que, posteriormente, deben ser sometidas a tratamientos térmicos, tanto termoquímicos (cementación o carbonitruración) para los de bajo contenido en carbono como de temple y revenido para los de medio y alto contenido en este elemento.

El control del crecimiento del tamaño de grano en los aceros que contienen aluminio, en realidad, lo ejercen los precipitados de nitruro de aluminio (3). Es por tanto fundamental mantener la correcta proporción de dichos precipitados en el acero, controlando la relación de aluminio y nitrógeno en el mismo (4-5).

La cantidad de nitruros de aluminio presente en el acero depende en principio de los siguientes factores:

- El contenido de aluminio y de nitrógeno de la aleación.
- La temperatura de laminación en caliente que determina la proporción de aluminio y nitrógeno final.
- El proceso de recocido final que determina la precipitación de los nitruros de aluminio, sea cual sea la temperatura de laminación en caliente.

La figura 1 muestra la dependencia de los contenidos de aluminio y nitrógeno en la fracción de volumen de precipitados de AlN, según el trabajo de Cook (3), después de un tratamiento de cementación a 900 °C. Se observa cómo la variación en el contenido de nitrógeno, desde 0,005 a 0,01, duplica la cantidad de nitruros de aluminio precipitados en el acero.

La evolución del tamaño de grano, durante un proceso de cementación o carbonitruración,

(*) Trabajo recibido el día 12 de enero de 1999 y aceptado en su forma final el 16 de julio de 1999.

(*) Tratamientos Térmicos Carreras S.A. Grupo TTC, Ingeniero Playá 3842, 08205 Sabadell (Barcelona, España)

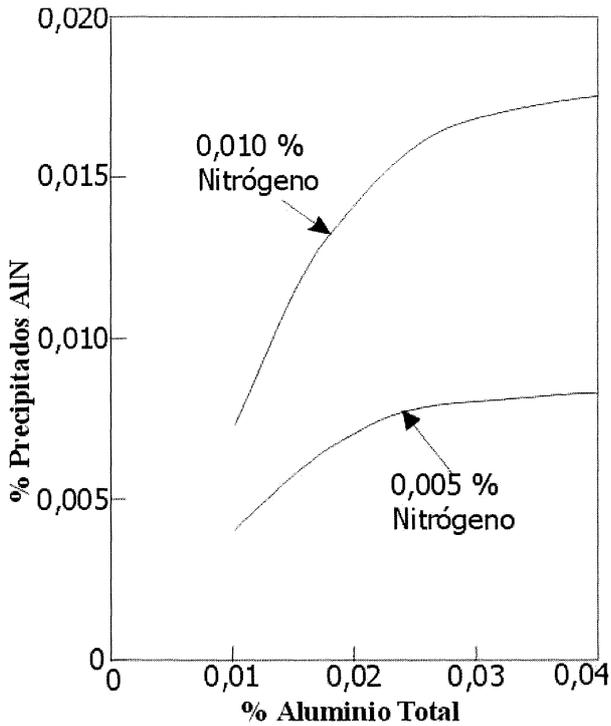


FIG. 1.— Efecto del contenido de nitrógeno y aluminio de un acero no aleado sobre la cantidad de precipitados de nitruro de aluminio después de un tratamiento térmico a 900 °C (3).

FIG. 1.— Effect of nitrogen and aluminium on the amount of aluminium nitride precipitates after a thermal treatment at 900 °C (3).

dependerá únicamente de la concentración de nitruros de aluminio en ausencia de otros afinadores de grano presentes antes del tratamiento termoquímico.

Varios autores sugieren la adición de elementos, cromo y titanio en contenidos cercanos al 0,02 %, como uno de los métodos de reducción de la cantidad de aluminio aportada al acero. El efecto del recocido final es el de incrementar el contenido final de nitrógeno del acero con lo que se favorece la precipitación de nitruros de aluminio. Indudablemente, es determinante la composición de la atmósfera empleada en el proceso (4),

Es de destacar la pobre respuesta frente a la templabilidad que presentan los aceros con contenidos de aluminio. Esta pobre respuesta, después de los tratamientos térmicos realizados a las temperaturas teóricas de los mismos, es atribuible a la presencia de estructuras de partida con tamaño de grano excesivamente fino como consecuencia de un contenido elevado de precipitados de nitruro de aluminio (5). Un incremento del contenido de nitrógeno, desde 0,006 a 0,013 %, provocado durante la fase de recocido y que da lugar a la aparición de precipitados de nitruro de aluminio hasta una profundidad de 0,4 mm, afecta la templabilidad de esta zona imposibilitando la obtención parcial o total de martensitas,

ya sea después de un tratamiento termoquímico o un simple temple con enfriamiento en aceite. El mismo acero, pero con contenidos de nitrógeno y aluminio restringidos a 0,005 y 0,015 respectivamente, responde perfectamente al temple en idénticas condiciones del medio de enfriamiento (5 y 6).

Otro factor que influye en la templabilidad es la heterogeneidad en la distribución de los precipitados de nitruro de aluminio en el seno de la estructura. La aparición de granos dúplex en los núcleos de aceros de bajo contenido en carbono (0,15 %) después de procesos termoquímicos como carbonitruraciones, en los que la temperatura de austenitización no ha sobrepasado los 860 °C, es imputable a dicha heterogeneidad (7). En los ensayos efectuados se han obtenido granos totalmente bainíticos, de tamaño 2 ASTM, con durezas de 540 HV en el seno de una estructura ferrítico-perlítica (80-20 %) de granos de tamaño 7-8 ASTM. y durezas de 180-200 HV.

En la figura 2, según los datos de Jones *et al.* (8) se expresa la relación entre el contenido de nitrógeno y aluminio y el tamaño de grano obtenido después de austenizar a 850, 875 y 925 °C, temperaturas

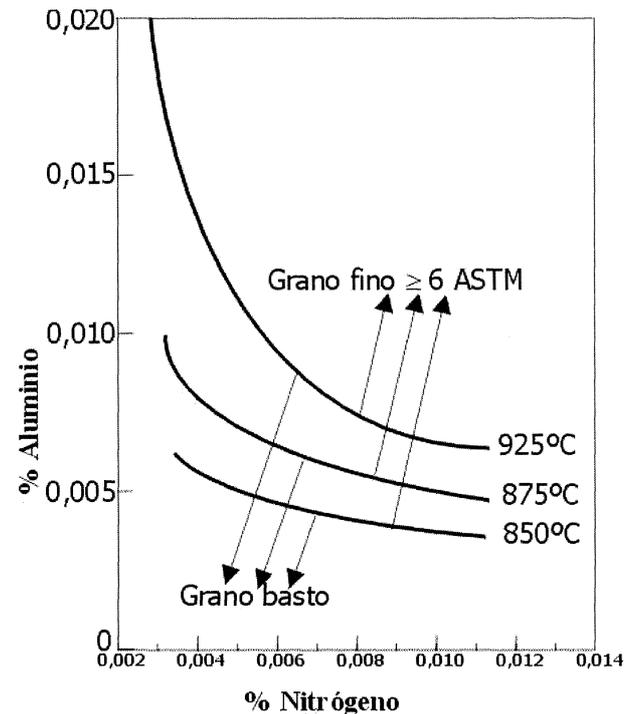


FIG. 2.— Relación entre el contenido de aluminio y nitrógeno de un acero al carbono en la obtención de tamaños de grano después de una cementación (925 °C), una carbonitruración (875 °C) o un temple (850 °C) (8).

FIG. 2.— Relation between the amount of aluminum, nitrogen and the grain size in a plain steel after carburizing (925 °C), carbonitriding (875 °C) or quenching (850 °C) (8).

habituales en temple, carbonitruración y cementación. Las curvas delimitan concentraciones de nitrógeno y aluminio que para cada temperatura producen aumento del tamaño de grano.

Los aceros de bajo contenido de carbono, que deben ser sometidos a procesos tipo cementación o carbonitruración en el caso de contenidos de aluminio superiores a 0,02 %, pueden conducir a resultados tan dispares, según pudimos comprobar, como capas endurecidas desde 0,012 a 0,13 mm, y con variaciones en los valores de la dureza superficial desde 500 a 850 HV1. Debe resaltarse que altas concentraciones de nitruros de aluminio afectan únicamente a la templabilidad, pero no a la capacidad de absorción de carbono del acero.

En este trabajo se desea determinar el efecto de la presencia de aluminio en aceros al carbono.

2. PARTE EXPERIMENTAL

La composición de los aceros estudiados se da en la tabla I. Se trata de dos aceros para cementación, acero 2A y 3A, que contienen 0,13 y 0,16 % C, y dos modificaciones de estos, 2B y 3B, caracterizadas por un enriquecimiento en aluminio. Los aceros se suministraron en forma de palanquilla. Los tamaños de grano austenítico de los cuatro aceros, caracterizados por el número ASTM, se describen en la tabla II. La determinación del tamaño de grano austenítico se realizó templando desde 900 °C en agua y aceite. Se observa que el tamaño de grano austenítico es inferior en los aceros con una cantidad mayor de aluminio.

Antes de realizar los tratamientos superficiales, se realiza un tratamiento de normalizado a 900 °C durante 30 min y enfriamiento al aire.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un factor que influye sobre la templabilidad de un acero es la microestructura que se obtiene después del normalizado. La figura 3 muestra dicha micro-

TABLA II.— Tamaños de grano austenítico de los cuatro aceros, caracterizados por el número ASTM

TABLE II.— ASTM grain size of the four steels

| Grano ASTM | | | |
|------------|--------|-------|--------|
| Acero | Aceite | Agua | |
| 2 A | 2 – 3 | 2 – 4 | Sin Al |
| 2 B | 7 – 8 | 7 – 8 | Con Al |
| 3 A | 2 – 3 | 3 – 5 | Sin Al |
| 3 B | 6 – 7 | 7 – 8 | Con Al |



FIG. 3.— Microestructura del acero 2A después del tratamiento de normalizado (x200).

FIG. 3.— Microstructure of steel 2A after the normalized treatment (200x).

estructura para el acero 2A en el que se observan grandes agrupaciones de estructuras aciculares de ferrita y perlita en el seno de la habitual de pequeños granos poligonales. Este tipo de estructura es el que evoluciona después de temple en la operación

TABLA I.— Composición química de los cuatro aceros estudiados (% en masa)

TABLE I.— Chemical composition of the four steels studied (wt. %)

| Acero | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 2 A | 0,13 | 0,18 | 0,82 | 0,036 | 0,041 | 0,10 | 0,04 | 0,09 | 0,002 |
| 2 B | 0,13 | 0,18 | 0,82 | 0,036 | 0,041 | 0,10 | 0,04 | 0,09 | 0,041 |
| 3 A | 0,16 | 0,14 | 0,75 | 0,041 | 0,043 | 0,20 | 0,08 | 0,31 | 0,002 |
| 3 B | 0,16 | 0,14 | 0,75 | 0,041 | 0,043 | 0,20 | 0,08 | 0,31 | 0,021 |

de carbonitruración o cementación hacia grandes granos bainíticos, según muestra la figura 4, dando lugar a fragilización del núcleo y bajas características mecánicas de la pieza.

La influencia sobre la templabilidad del contenido de aluminio de aceros al carbono, que se manifiesta en los distintos tamaños de grano obtenidos, queda reflejada en la figura 5 para los cuatro aceros estudiados en este trabajo.

Se observa que los aceros que no contienen aluminio y con un tamaño de grano mayor (2-3 ASTM) tienen una mejor templabilidad. Así, mientras es posible obtener una capa de 0,6 mm endurecida a 500 HV1 sobre un diámetro de 25 mm en un acero exento de aluminio con mayor tamaño de grano, sólo se obtiene una capa endurecida no homogénea de 0,5 mm y únicamente sobre un diámetro no superior a 6 mm cuando se incorpora aluminio.

A continuación, se describen los resultados de dos casos concretos de tratamiento realizados en nuestras instalaciones para determinar el efecto del contenido de aluminio en piezas industriales.

En el primer caso se estudió el tratamiento de un eje de 7 mm de diámetro de un acero F-1513 al que se añadió 0,026 % Al. El acero F-1513 (DIN C-15) puede corresponder, tanto al acero 2A como al 3A. La atmósfera del recocido es N_2-H_2 según una relación 93/7. La microestructura del material de partida, después del recocido, se da en la figura 6. Consiste en una estructura ferrítica de tamaño de grano 6-9 ASTM. Se efectuó un tratamiento de carbonitruración a 875 °C durante 2 h con potencial de carbono de 0,90 % en atmósfera de aire y H_4C con

3 % H_3N . El enfriamiento fue en aceite a 60 °C, que garantiza una velocidad de enfriamiento entre 86 y 88 °C/s. Se obtuvo una dureza superficial de 690-840 HV1 con profundidad de capa a 500 HV1 entre

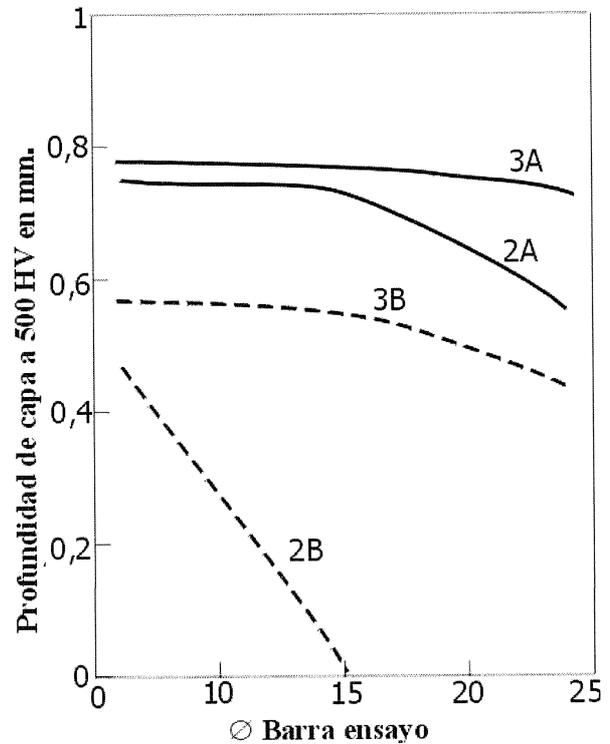


FIG. 5.— Efecto del aluminio sobre la templabilidad de los cuatro aceros.

FIG. 5.— Effect of aluminum content on hardenability of the four steels

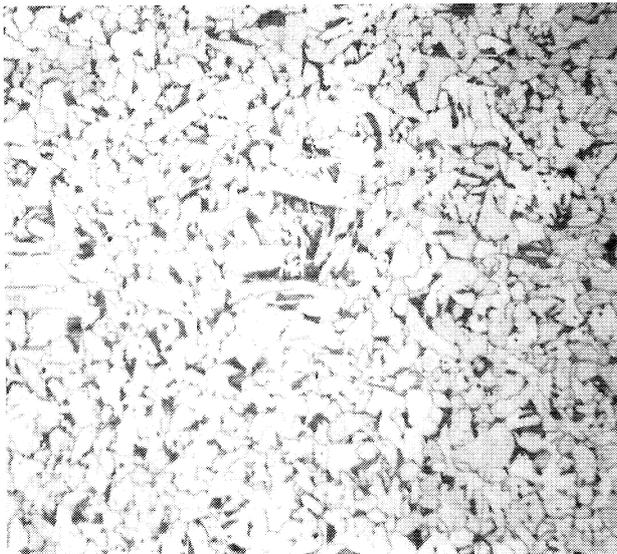


FIG. 4.— Microestructura del acero 2A después del tratamiento de cementación (x200).

FIG. 4.— Microstructure of steel 2A after the carburizing treatment (200x).

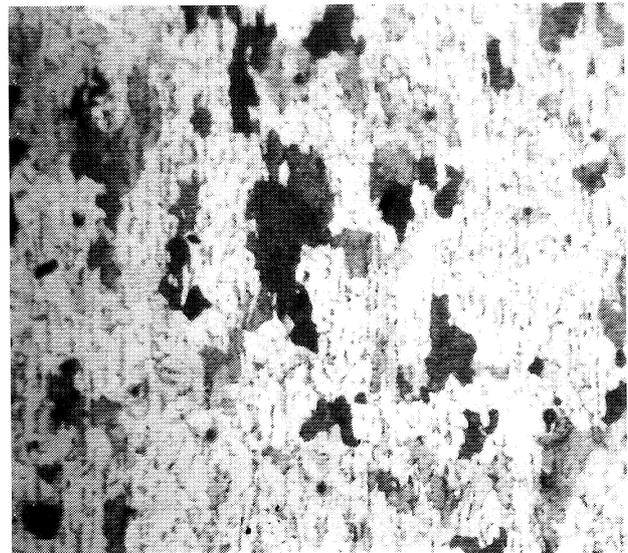


Fig. 6.- Microestructura de un eje de 7 mm de diámetro de acero F-1513 después del recocido (x200).

Fig. 6.- Microstructure of the 7 mm diameter F-1513 steel shaft after annealing (200x).

0,08 y 0,15 mm y profundidad de difusión de carbono de 0,28 mm. Las estructuras obtenidas en la superficie y en el núcleo de la pieza se dan en las figuras 7 y 8 respectivamente. La figura 7 muestra una estructura consistente de placas martensíticas con perlitas de temple en el contorno de grano. En contraste, la estructura del núcleo es ferrítico-perlítica con grano fino. También se efectuó un tratamiento de cementación en esta pieza a 910 °C durante 2 h y 15 min con potencial de carbono de 1,12 % en atmósfera de aire y H_4C y enfriamiento en el mismo aceite a 60 °C. Se obtuvo una dureza superficial de 680-840 HV1 con profundidad de capa a 500 HV1 entre 0,11 y 0,14 mm y profundidad de difusión de carbono de 0,54 mm. Las estructuras obtenidas fueron prácticamente idénticas al tratamiento de carbonitruración. Las estructuras después, tanto del tratamiento de carbonitruración como el de cementación son incompatibles con las características de alta calidad de la pieza después del tratamiento.

El otro caso es una pieza en forma de fleje de 4 mm de espesor del acero F-1513 con 0,034 % Al. En el estado de partida se hizo un recocido obteniéndose un tamaño de grano de 6-7 ASTM. La atmósfera de recocido fue de N_2-H_2 según una relación 93/7. La microestructura de partida es ferrítico-perlítica según se observa en la figura 9.

Se efectuó un tratamiento de carbonitruración a 860 °C durante 2 h con potencial de carbono de 0,85 % en atmósfera de aire y H_4C con 3 % H_3N . El enfriamiento fue en aceite a 60 °C. Se obtuvo

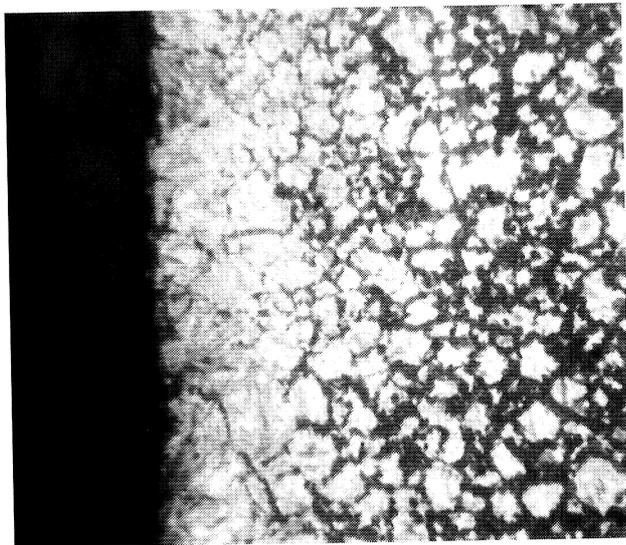


FIG. 7.— Microestructura de un eje de 7 mm de diámetro de acero F-1513 después del tratamiento de carbonitruración (x500).

FIG. 7.— Microstructure of the 7 mm diameter F 1513 steel shaft after the carbonitriding treatment (500x).

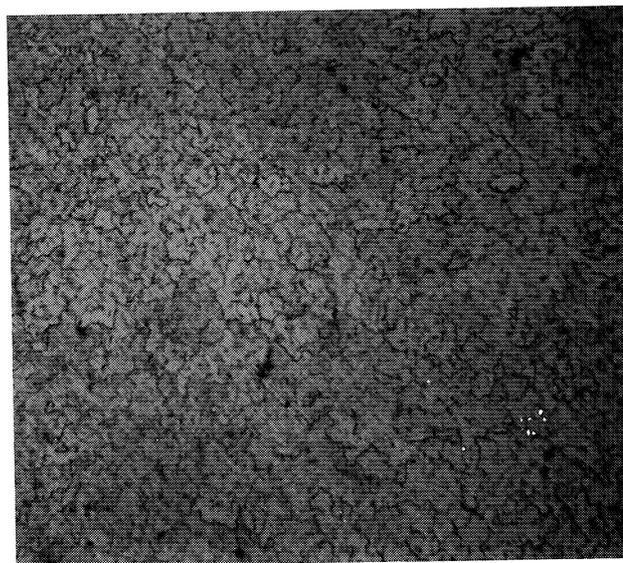


FIG. 8.— Microestructura de un eje de 7 mm de diámetro de acero F-1513 después del tratamiento de cementación (x200).

FIG. 8.— Microstructure of the 7 mm diameter F-1513 steel shaft after the carburizing treatment (500x).

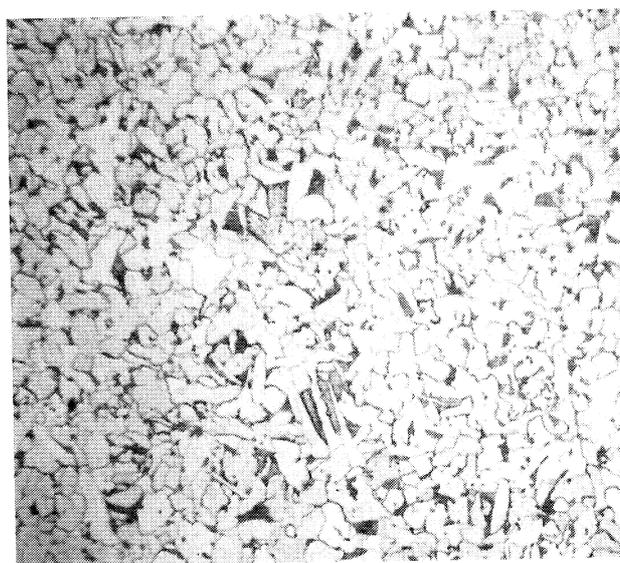


FIG. 9.— Microestructura de un fleje de 4 mm de espesor del acero F-1513 después del recocido (x200).

FIG. 9.— Microstructure of the 4 mm thickness F-1513 steel strap after annealing (200x).

una dureza superficial de 730-880 HV1 con profundidad de capa a 500 HV1 entre 0,12 y 0,21 mm y profundidad de difusión de carbono de 0,28 mm. La superficie consiste en una estructura totalmente martensítica con un porcentaje de granos anormalmente grandes. La estructura del núcleo, dada en la figura 10, consiste en grandes granos bainíticos de

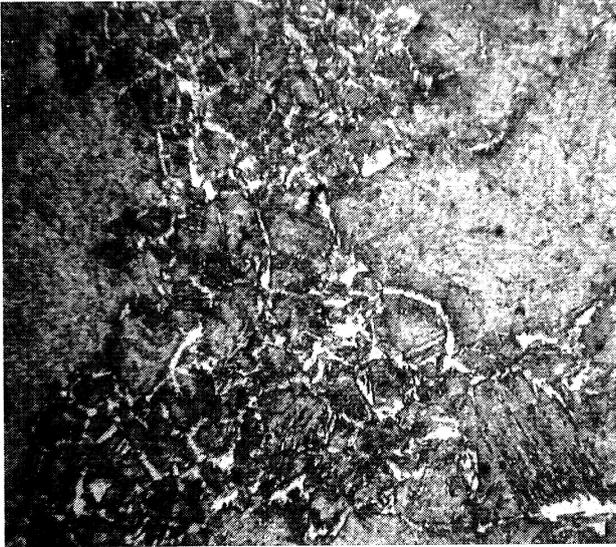


FIG. 10.— Microestructura de un fleje de 4 mm de espesor del acero F-1513 después del tratamiento de cementación (x500).

FIG. 10.— Microstructure of the 4 mm thickness F-1513 steel strap after the carburizing treatment (500x).

tamaño 2-3 ASTM en el seno de una estructura ferrítico-perlítica de tamaño de grano 6-8 ASTM. Este tratamiento también es incompatible con las características de alta calidad de la pieza después del tratamiento.

4. CONCLUSIONES

- El aluminio es un potente aliado para la obtención de aceros con tamaño de grano fino.
- El contenido de aluminio del acero debe mantenerse dentro de los límites determinados en este trabajo (entre 0,005 y 0,02 %), con objeto de mantener el control sobre la cantidad de precipitados de nitruros de aluminio. También es importante el control sobre el nitrógeno.
- Es indiscutiblemente nefasta la influencia de los nitruros de aluminio sobre la templabilidad de los aceros al carbono cuando el contenido de aluminio excede el máximo aconsejado.

- La heterogeneidad en el reparto de los precipitados de nitruro de aluminio conduce a fenómenos de crecimiento de grano en las capas endurecidas y a la aparición de granos dúplex en el núcleo.
- Existe una clara influencia de la fase de recocido después de la laminación sobre la cantidad de nitruros de aluminio presentes en el acero.
- El empleo de elementos de sustitución tales como el cromo y el titanio permiten un control efectivo del crecimiento del grano, al tiempo que garantizan una correcta templabilidad.
- El empleo de severidades de temple superiores a 88 °C/s (agua pura o agua conteniendo polímeros) permitirían obtener capas endurecidas totalmente transformadas, pero en ningún caso resolverían los problemas de crecimientos heterogéneos de grano, al tiempo que limitaría, enormemente, la utilización de algunos hornos en la ejecución de determinados tratamientos.

Agradecimientos

Se agradece a la empresa Houghton Ibérica, y en especial a su departamento de T.T. y Procesos Industriales, los ensayos de constatación de la severidad de temple de los aceites utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS

- (1) *Heat Treat. Met.*, 22 (1), 1995: 12.
- (2) WADE, B.A., MORRIS, R.F. y DRAPER, K.J. *Heat Treat. Met.*, 23 (1), 1996: 15.
- (3) COOK, W.T. *Heat Treat. Met.*, 11 (1), 1984: 21.
- (4) POKORNY, J. y POKORNY, A. *Album de Metalographie*, C.S.S., Paris 1971, p. 61.2.
- (5) GLADMAN, T. *Heat Treat. Met.*, 21 (1), 1994: 11.
- (6) WEND, E.J., MUNK, D.E., KING, I. y KILHEFNER, P.T. *Heat Treat. Met.*, 21 (1), 1994: 55.
- (7) RYU, J.H. y HWANG, E.U. *Proc. 6th Int. Sem. IFHT*, Kyoneju (Corea), 1997: 293.
- (8) JONES, A. y EVANS, P.J. *Heat Treat. Met.*, 20 (4), 1993: 99.