

ANÁLISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LOS CILINDROS DE TRABAJO DE LOS TRENES DE BANDAS EN CALIENTE

F.J. Belzunce, A. Ziadi y C. Rodriguez

Universidad de Oviedo, E.P.S. de Ingeniería, campus universitario, 33203 Gijón

Resumen. Se han analizado las exigentes condiciones en las que deben asegurarse un servicio seguro los cilindros de trabajo de las diferentes cajas que componen los trenes de bandas en caliente (TBC), entre las que destacan, principalmente, la resistencia al crecimiento de grietas de origen térmico y la resistencia al desgaste abrasivo. Se exponen a continuación las aleaciones férricas, muy aleadas, más utilizadas en estas aplicaciones y se comparan sus microestructuras y propiedades fundamentales, para finalmente pasar a estudiar el comportamiento de estos productos ante las condiciones típicas de uso y, también, la manera de modificar sus microestructuras con objeto de mejorar el rendimiento en servicio de los mismos en esta aplicación particular.

Abstract. The highly demanded service conditions of rolling rolls used in the manufacture of hot strip rolling roll mills were analysed. The resistance to firecracks propagation and also to abrasive wear are the two most important requirements needed in this application. The different high alloyed ferrous products used are described and their microstructures and fundamental properties compared. Finally, the in-service behaviour of all these products are evaluated, as well as the microstructure modifications recommended in order to improve their performance in this particular application.

1. INTRODUCCIÓN

La etapa fundamental de la laminación de productos planos de acero es la conversión de los desbastes de colada continua (de más de 200 mm de espesor) en chapa gruesa (hasta 2 mm de espesor) en los denominados trenes de bandas en caliente (TBC), para lo que el desbaste debe calentarse a unos 1250°C con objeto de facilitar su deformación plástica. Aunque existen diferentes tipos de trenes capaces de realizar estas operaciones, si nos centramos en los que se caracterizan por su alta productividad (aquellos que son capaces de tratar más de un millón de toneladas al año), citaremos los trenes semicontinuos y los continuos.

Un tren semicontinuo consta de unos hornos de recalentamiento de los desbastes, un tren descascarillador, una potente caja reversible desbastadora (en ella el producto sufre una fuerte reducción de espesor entrando sucesivamente en ambos sentidos), un tren acabador continuo, constituido por, al menos, 4 cajas y finalmente las bobinadoras de chapa. Por otro lado, en los trenes continuos, el desbaste se mueve exclusivamente en un único sentido, de tal manera que las diferentes pasadas de laminación se realizan en cada una de las cajas que constituye el tren (Figura 1), que consta normalmente de 4 o 5 cajas desbastadoras (R1,..., R5) seguidas de 6-7 cajas acabadoras (F1, ..., F7), todas ellas dispuestas en serie [1].

Los cilindros de trabajo de estos trenes están expuestos a unas condiciones de servicio muy exigentes, siendo especialmente intensas las sollicitaciones térmicas y el desgaste abrasivo, que serán descritas con detalle en el epígrafe siguiente. De cualquier modo, el aumento de la productividad de los cilindros se consigue extendiendo la duración de sus campañas (mayor número de toneladas laminadas por puesta) y disminuyendo la reducción de diámetro en las operaciones intermedias de mantenimiento, que se ejecutan mediante rectificado para eliminar la región superficial dañada. Al acabar la campaña, se inspecciona visualmente la superficie de los cilindros, se rectifican, y a continuación se controlan por líquidos penetrantes para asegurar que no queda defecto alguno, antes de colocarlos de nuevo en el tren. Cada par de cilindros se usa hasta que llegan a su diámetro mínimo, lo que define el número total de toneladas de chapa laminadas.

Debe tenerse en cuenta que cualquier mejora en el comportamiento de los cilindros de trabajo de los trenes de bandas en caliente se traduce en:

- Mejor calidad superficial de la chapa laminada, es decir, menos rechazos en el producto final.
- Aumento de su productividad (t. laminadas/mm).
- Al disminuir el número de veces que hay que cambiar los cilindros, la productividad del tren también aumenta.
- Menor stock de cilindros.

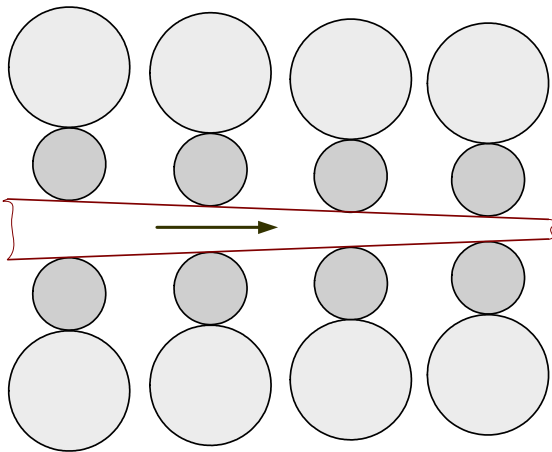


Fig. 1. Tren continuo de bandas en caliente (4 cajas)

2. CONDICIONES DE TRABAJO DE LOS CILINDROS DE LOS TBC

A la salida de los hornos de recalentamiento la temperatura de la banda es de unos 1250°C. De este modo las condiciones de trabajo de un cilindro de laminación en caliente son enormemente exigentes: la superficie del cilindro se calienta desde unos 80°C (ya en situación estacionaria) hasta 600°C en 1 s, y al continuar su giro, en virtud del intenso riego con agua de refrigeración, se enfría hasta alcanzar de nuevo los 80°C en unos 4 s [2, 3, 4]. Estas variaciones térmicas generan ciclos de fatiga térmica muy fuertes en las regiones más superficiales (afecta a una profundidad de 1-2 mm): cuando la superficie del cilindro se calienta rápidamente en contacto con la chapa caliente, aparecen tensiones longitudinales y circunferenciales de compresión, mientras que, por el contrario, cuando al continuar el giro del cilindro, el agua de refrigeración enfría súbitamente su superficie caliente, se crean tensiones circunferenciales y longitudinales de tracción en superficie (Figura 2). Por otro lado, la temperatura máxima que alcanza la superficie del cilindro en contacto con la banda de acero es distinta en cada caja. Debe tenerse en cuenta que en un tren continuo la reducción progresiva del espesor de la banda se traduce en un importante incremento de la velocidad de ésta. A este factor debe añadirse el hecho de que las diferentes reducciones típicas de cada caja dan lugar a diferentes ángulos de contacto, lo que finalmente se traduce en la existencia de unos ciclos térmicos bien diferentes en las distintas cajas. La Figura 3 muestra que la temperatura de la superficie del cilindro se calienta rápidamente en cuanto se inicia el contacto con la banda (punto A) hasta alcanzar un pico máximo (B) al cesar el contacto y comenzar a recibir el agua de refrigeración. Este pico alcanza valores bastante altos en las primeras cajas acabadoras en virtud, principalmente, del mayor tiempo de contacto con la banda que impera en estas cajas. Los tiempos de contacto y, en consecuencia, los máximos

de temperatura son aún mayores en las cajas desbastadoras (unos 75°C más altos) [5].

Las tensiones superficiales de tracción que se generan cíclicamente en cada giro del cilindro son lo suficientemente altas como para originar inevitablemente una maraña de grietas térmicas al cabo de un tiempo de trabajo corto, que son relativamente profundas en el caso de las primeras cajas acabadoras que ya son muy finas en las últimas cajas acabadoras (Figura 4). Las grietas térmicas se ramifican internamente en virtud de los fuertes picos de compresión en las regiones de contacto cilindro de trabajo-cilindro de apoyo (tensiones de Hertz, que implican picos de compresión incluso superiores a 2000 MPa), que aumentan progresivamente al hacerlo la fuerza de laminación por unidad de superficie que, a su vez, se incrementa la irse enfriando la chapa.

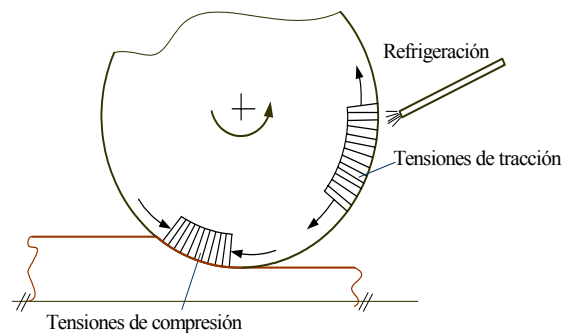


Fig. 2. Tensiones térmicas sobre la superficie del cilindro de trabajo en el curso de la laminación de una banda de acero

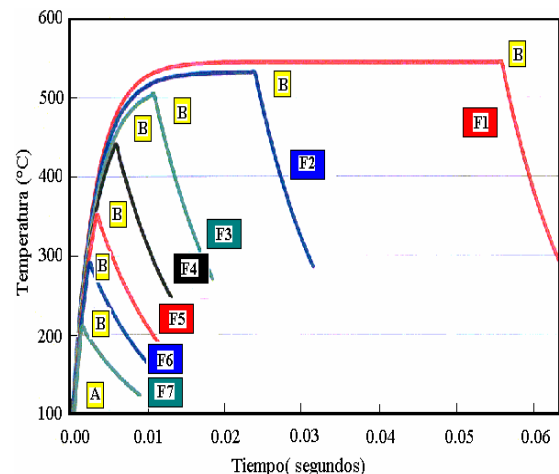


Fig. 3. Ciclo térmico que actúa sobre la superficie de los cilindros en las diferentes cajas del TBC. F1: primera caja acabadora,..... F7: última caja acabadora

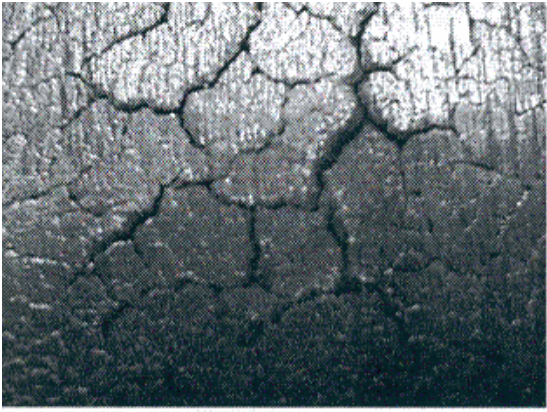


Fig. 4. Entramado de grietas térmicas sobre la superficie de los cilindros.

La superficie del cilindro caliente sufre también fenómenos de oxidación y abrasión. El desgaste, de tipo abrasivo, del cilindro de trabajo se debe a la acción de la fuerza de laminación junto a la existencia de un cierto deslizamiento a lo largo del arco de contacto entre el cilindro y el producto que se está laminando y, fundamentalmente, a la presencia de una capa de óxido abrasiva, que se forma en virtud de la oxidación a alta temperatura, en contacto con el oxígeno del aire, de la chapa que se está laminando. La dureza de la capa superficial de óxido de la chapa que se está laminando es el factor principal que justifica el desgaste del cilindro. Sobre la superficie muy caliente de una banda de acero se forman tres capas de óxido, una interna de FeO, otra intermedia de Fe₃O₄ y, por último, una más externa de Fe₂O₃, cuyas durezas medias (a temperatura ambiente) son 350, 450 y 1000 HV respectivamente. Por otro lado, el espesor relativo de estas tres capas de óxido depende de la temperatura de la banda, como se refleja porcentualmente en la Figura 5 [6]. En la figura puede verse que en las primeras cajas desbastadoras (R1, R2, 1250-1200°C) se forma un porcentaje importante de óxido abrasivo Fe₂O₃ sobre una capa más gruesa de Fe₃O₄, mientras que, por el contrario, en las últimas cajas acabadoras (F4,... F7, 950-850°C) predomina el óxido FeO, mucho menos abrasivo, lo que justifica, en gran parte, las variaciones de desgaste que se observan habitualmente en las diferentes cajas de los TBC. Recuérdese también que el espesor de la capa de óxido aumenta con la temperatura.

Además, cuando la chapa entra en la caja de laminación, sobre su superficie cae agua de refrigeración y aceite de lubricación que quedan atrapados en las pequeñas depresiones (grietas, poros, etc.) de la superficie del cilindro. Estos líquidos crean fuertes presiones puntuales bajo muy pequeños deslizamientos que pueden inducir la erosión superficial del cilindro de trabajo.

Por otro lado, cada 2-3 minutos se producen impactos violentos de los extremos de la chapa, relativamente

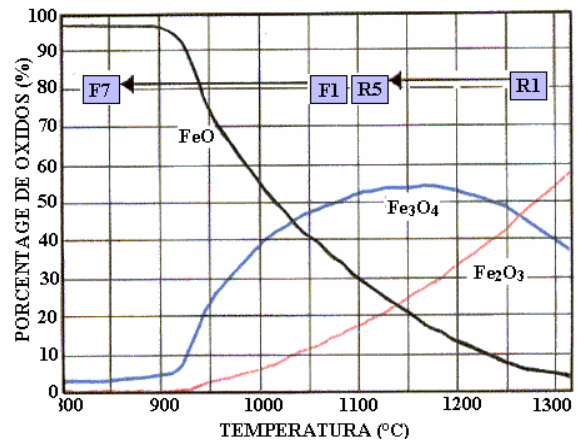


Fig. 5. Evolución de los óxidos superficiales con la temperatura de la banda

fríos (entrada de la banda), contra los cilindros, aparte de otras múltiples incidencias ocasionales de consecuencias similares, debiendo también tenerse en cuenta que en los periodos de inactividad, su temperatura desciende a 40-50°C[2].

Finalmente no hay que olvidar la existencia de tensiones de flexión y torsión variables, que alcanzan valores máximos en la región de los cuellos.

3. MATERIALES

3.1. Composiciones químicas y microestructuras

Bajo las condiciones de servicio expuestas, los cilindros de las primeras cajas acabadoras deben poseer resistencia a la fatiga térmica, a la oxidación y alta tenacidad (estas mismas propiedades se requieren aún en mayor medida en las cajas desbastadoras) ya que la temperatura de la banda y el tiempo de contacto con ella son mayores, mientras que en las últimas cajas acabadoras es prioritaria la resistencia al desgaste [7].

En las últimas cajas acabadoras de los TBC (F5, F6, y F7) se utiliza fundición de temple indefinido (FTI) o de temple indefinido modificada (TIM), mientras que en las primeras (F1, F2, F3 y F4) se está cambiando este material por la fundición de alto cromo (FAC) o mejor, hoy día, por el acero rápido (ARAP). La tabla 1 da cuenta de las composiciones químicas y dureza de estos cuatro productos junto con la de los aceros altos en cromo, que se utilizan en las cajas desbastadoras.

Los cilindros de trabajo de los TBC se obtienen normalmente mediante procesos de moldeo y luego deben ser tratados térmicamente con objeto tanto de reducir la segregación típica de estos procesos como de obtener las altas propiedades superficiales requeridas en estas aplicaciones. Se ejecutan de este modo tratamientos de temple superficial (martensítico o bainítico) seguidos de uno o varios revenidos. La microestructura final de todos estos productos consta de diferentes porcentajes de carburos tipo MC (V,

3000 HV), M_2C (W, Mo, 2000 HV), M_6C (W, Mo, Fe, Cr, 1500 HV), M_7C_3 (Cr, 1800 HV) y $M_{23}C_6$ (Cr, 1200 HV) dispersos en unas matrices bainito-martensíticas. Mientras la Figura 6 muestra la evolución de la dureza final de un acero rápido con el parámetro de revenido, la Figura 7 da cuenta de la microestructura típica final de este tipo de aceros.

Tabla 1. Composiciones químicas y dureza

Calidad	%C	%Cr	%Ni	%Mo
FTI	3-3.5	1-2	3-5	0.2-0.5
TIM	3-3.5	1-2	3.5-6	0.2-0.5
FAC	2.3-3	13-18	0.4-1.2	1-3
ARAP	1-2	3-8	1-7	5-10
AAC	0.8-2	10-14	1-2	3-5.5
Calidad	%Nb+V	%W		HRC
FTI	-----	-----		56-60
TIM	0.5-1.5	-----		57-61
FAC	-----	-----		49-59
ARAP	2-6	2-6		52-60
AAC	0.3-1	-----		48-56

La evolución que está teniendo lugar en el uso de estos productos busca mejorar la resistencia al desgaste del cilindro: los cilindros de temple indefinido tienen una matriz de martensita revenida con carburos tipo Fe_3C y grafito, las fundiciones de alto cromo tienen carburos M_7C_3 en una matriz de martensita revenida, mientras que los carburos de los aceros rápidos tienen una dureza muy alta y una fase matriz martensítica, también más dura, lo que ocasiona una dureza total superior. El inferior contenido de carbono de las calidades ARAP y AAC tiene la finalidad de evitar la formación de carburos eutécticos frágiles continuos, que aumentarían la fragilidad del cilindro.

3.2. Propiedades mecánicas

A la vista de las sollicitaciones de servicio, todos los materiales que se utilizan en la fabricación de los cilindros de trabajo de los TBC deben poseer las propiedades siguientes:

- a) Alta resistencia a la compresión (en frío y en caliente)
- b) Alta resistencia a la tracción en frío.
- c) Muy alta dureza en caliente.
- d) Tenacidad suficiente

La Tabla 2 da una idea de la resistencia mecánica a tracción (R_t) y a compresión (R_c) a temperatura ambiente (TA) y a 600°C de tres de los materiales que hoy en día se utilizan en esta aplicación, siendo sus tenacidades aproximadamente semejantes ($25-30 MPa\sqrt{m}$).

Los cilindros de trabajo de acero rápido tienen en comparación con los de fundición alta en cromo y los

de temple indefinido una mayor resistencia mecánica (y dureza) a igualdad de tenacidad.

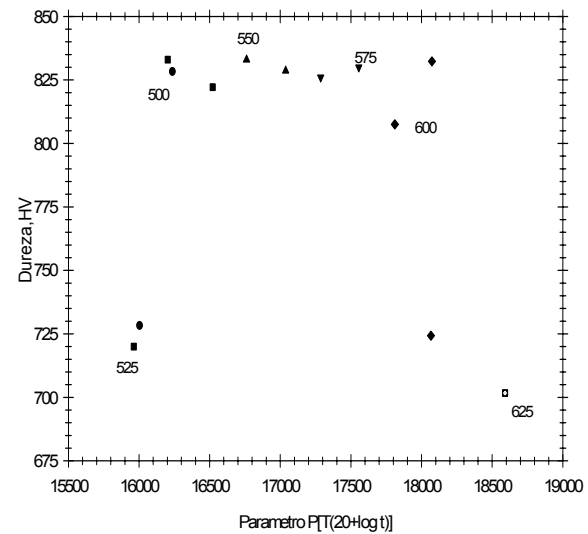


Fig. 6. Dureza de un acero rápido en función del parámetro de revenido

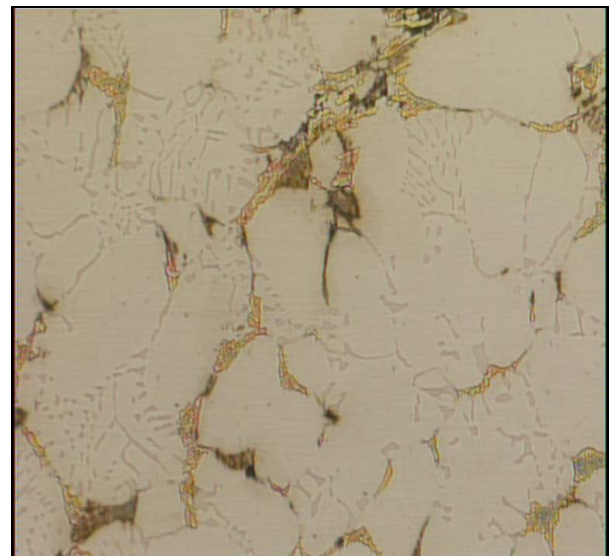


Fig. 7. Microestructura de un acero rápido

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales

Material	R_t (TA) (MPa)	R_c (TA) (MPa)	R_t (600°C) (MPa)
FTI	350-400	1500	250
FAC	750-850	~2000	550
ARAP	900-1000	2500-3000	750

3.3. Comportamiento en servicio

3.3.1. Grietas térmicas

Las grietas térmicas se inician en los carburos existentes en los bordes intercelulares (alta fragilidad y diferente coeficiente de expansión térmica que la fase matriz). Las grietas se detienen al encontrarse con la fase matriz y se nuclean de nuevo, más adelante, en otros carburos. Las grietas progresan a lo largo de los carburos intercelulares (Figura 8). De este modo la tenacidad de todos estos productos disminuye al incrementar la fracción volumétrica total de carburos, aunque también influye el tamaño, la distribución de éstos y la dureza de la matriz de naturaleza martensítica.

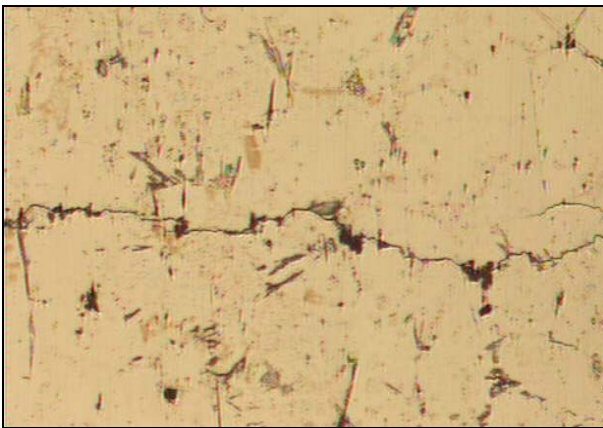


Fig. 8. Crecimiento de una grieta a través de la microestructura de un acero rápido.

La resistencia a la fatiga térmica de los cilindros de trabajo depende de su resistencia a la tracción y de su resistencia a compresión a alta temperatura (σ), así como de otras propiedades físicas tales como la conductividad térmica (K), el coeficiente de expansión térmica (α) y el módulo de elasticidad (E), de tal manera que el efecto conjunto de todos estos parámetros se puede describir a partir del factor de Eichelberg:

$$FE = (1-\nu) K \sigma / E \alpha$$

De este modo resulta que la resistencia a la fatiga térmica del acero rápido es muy superior tanto a la de la fundición alta en cromo como a la de temple indefinido y la densidad de grietas que se generan por este motivo también es apreciablemente menor en aquél ya que estos aceros poseen un factor de Eichelberg más alto que las fundiciones altas en cromo y las de temple indefinido, debido principalmente a su superior conductividad térmica y resistencia mecánica [8].

Estas grietas térmicas crecen progresivamente en virtud de las tensiones tanto térmicas como mecánicas

que se repiten cíclicamente durante el giro del cilindro hasta que, si alcanzan un tamaño suficiente (tamaño crítico) pueden dar lugar a desconches (desprendimientos de trozos del cilindro) o incluso a la rotura completa del cilindro. Otros iniciadores del daño pueden ser pequeñas grietas generadas por impactos, sobrecargas ocasionales o defectos de fabricación.

La resistencia al agrietamiento térmico, al igual que la tenacidad a la fractura, dependen del tamaño y forma de los carburos: Los mejores resultados se obtienen con carburos pequeños y esféricos. El comportamiento de los aceros rápidos puede llegar a ser, a este respecto, hasta 5 veces mejor que el de las fundiciones altas en cromo [9].

3.3.2. Resistencia al desgaste

La resistencia al desgaste del acero rápido es mucho mejor que el de los demás materiales. Esta depende mucho de la dureza en caliente, que es apreciablemente mayor en el acero rápido.

El desarrollo de los cilindros de trabajo de acero rápido ha supuesto un incremento entre 3 y 5 veces de su resistencia al desgaste en servicio, junto con el aumento del tiempo entre puestas y un mejor control de la planitud de la chapa [10].

Aunque la resistencia al desgaste aumenta proporcionalmente al aumento de la fracción de VC, si se considera la rugosidad superficial (que desde el punto de vista del servicio de estos elementos es un factor más importante que el desgaste -pérdida de peso-), los carburos del tipo MC no favorecen el comportamiento porque dan lugar a un desgaste superficial desigual, debido a la aparición de adherencias en las protuberancias asociadas a estos carburos tan duros: el mejor comportamiento corresponde ahora a los aceros con un mayor contenido en carburos M_7C_3 (aleación con cromo), por tener una dureza más próxima a la de la fase matriz. Por otro lado, otro efecto positivo del cromo es que mejora la resistencia a la oxidación y contribuye al endurecimiento de la fase matriz en virtud de la precipitación de finos carburos $M_{23}C_6$.

La oxidación de todos estos productos a 500-600°C es parabólica y depende fundamentalmente del contenido de cromo y de la fracción de carburos. La oxidación comienza en la intercara carburo/matriz y prosigue selectivamente en la fase matriz: la resistencia a la corrosión aumenta al hacerlo el contenido de cromo de la fase matriz (éste depende de su contenido total y del contenido de carburos, ya que éstos fijan una parte importante del cromo). El óxido mayoritariamente formado es Fe_2O_3 , pero en las matrices con cromo se forma internamente también una espínela M_3O_4 , que dificulta la difusión iónica.

3.3.3. Fricción

El uso de aceros rápidos incrementa el coeficiente de fricción entre el cilindro y la banda caliente en relación al típico de las fundiciones altas en cromo, lo que hace aumentar en un 10-25% la fuerza necesaria para la laminación, lo que también implica el aumento del consumo eléctrico del tren. Este punto parece estar motivado por la mayor oxidación del acero rápido y por el tipo de óxido que se forma, siendo especialmente sensibles a la oxidación los óxidos que se desarrollan sobre los carburos del tipo MC [10]. Además, esta mayor fricción induce una generación de calor que puede calentar la banda de modo que se forme sobre ella el duro óxido, Fe_2O_3 , que dará lugar a defectos superficiales. Por esta razón, es muy importante a nivel práctico, trabajar con una buena lubricación (aceite en emulsión), que permitirá reducir la fricción en un 20%, para devolverla a sus niveles normales y utilizar también una abundante refrigeración.

Es precisamente el mayor coeficiente de fricción de los aceros rápidos la razón por la que éstos no se utilizan en las últimas cajas acabadoras. La acción principal que actúa sobre los cilindros de las últimas cajas acabadoras es el desgaste ya que la temperatura máxima que alcanzan es moderada (véase la Figura 3) mientras que la fuerza de laminación que actúa por unidad de superficie es la mayor, dado que la chapa, más fría, opone una mayor resistencia a su deformación. En estas situaciones, con objeto de minimizar el desgaste, es necesario trabajar en condiciones tales que el coeficiente de fricción del contacto sea lo menor posible, siendo ésta la razón principal del buen comportamiento que caracteriza a los cilindros de las calidades FTI y TIM, en las que el grafito, presente de manera dispersa en su microestructura, proporciona un efecto autolubricante muy apreciado. Debe, por otro lado, tenerse en cuenta que un coeficiente de fricción demasiado bajo no sería deseable en la primera caja del tren (R1), ya que en estas circunstancias el desbaste no se agarraría bien y podría incluso no entrar entre los rodillos.

4. CONCLUSIONES

Se han analizado las exigentes condiciones en las que deben asegurarse un servicio seguro los cilindros de trabajo de los TBC, entre las que destacan, principalmente, la resistencia al crecimiento de grietas de origen térmico y la resistencia al desgaste abrasivo. Los materiales con las microestructuras más adecuadas para soportar las citadas solicitaciones se basan en la precipitación de diferentes tipos de carburos, muy duros, en el seno de una matriz martensítica, dotada de una tenacidad suficiente. La composición química de estos productos y sus tratamientos térmicos deben optimizarse con objeto de asegurar una tenacidad suficiente, que evite el progreso de las grietas térmicas, al tiempo que asegure una alta resistencia al desgaste

en las condiciones de trabajo, resistencia a la oxidación y un coeficiente de fricción suficientemente bajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración de la empresa Fundición Nodular S.A. (Lugones, Asturias) su colaboración en el suministro de los materiales y también a la FICYT (Principado de Asturias) su apoyo económico, a través del Proyecto PC-CIS01-14.

REFERENCIAS

- [1] Roberts W.L., Flat processing of steel, Marcel Dekker Inc., New York, 1988.
- [2] Carless P., Present and future hot strip mill finishing train work rolls, Proceedings of the Rolls 2000+ Conference, Birmingham, 1999, pp.49-59.
- [3] Guerrero M.P., Pérez A. y Colás R., Heat transfer to the work rolls during hot rolling of steel, Proceedings of the Rolls 2000+ Conference, Birmingham, 1999, pp.108-112
- [4] Wankhede U. y Samarasekera I.V., Thermal behaviour of high speed steel work rolls in the finishing stands of a hot strip mill, Iron & Steel Met., 55-60, Mayo 1997.
- [5] Blazevic D.T., Hot strip mill operation, Vol. III: Roll wear, broken rolls and roll life, Ed. Blazevic D.T, Arizona, USA, 2002.
- [6] Beverly I., Robertson M. y Woodland M., Developing the use of high speed steel work rolls in the hot strip mills of british steel, Proceedings of the Rolls 2000+ Conference, Birmingham, 1999, pp. 81-89.
- [7] Hwang K.C., Lee S. y Lee H.C., Effects of alloying elements on microstructure and fracture properties of cast high speed steel rolls, Mat. Scie.&Eng. A254, 282-295, 1998.
- [8] Ryu J.H. y Ryu H.B., Correlation of rolled-in defects in IF steel and the thermal fatigue properties of the hot strip mill work rolls, 42° MWSP conf. Proc. ISS, vol. XXXVIII, 2000, pp. 223-231.
- [9] Goto K. et al., Basic characteristics and microstructure of high carbon high speed steel for hot rolling mill, ISIJ International, Vol.32, No. 11, 1184-1189, 1992.
- [10] Walmag G., Skoczynski R.J. y Breyer J.P., Improvement of the work roll performance on the 2050 mm hot strip mill at Iscor Vanderbijlpark, Revue de Métallurgie-CIT, 295-304, Marzo 2001.