

ESTUDIO DEL DETERIORO DE UN MOLDE METÁLICO

J.M. Gallardo, F.G. Cuevas, J. Cintas, J.M. Montes y E.J. Herrera

Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Universidad de Sevilla,
Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092-Sevilla

Resumen. Se ha estudiado el deterioro de placas de asiento y marcos de fundición, tanto gris como esferoidal, utilizados para el moldeo de moldes a utilizar en el moldeo de ánodos de cobre. Para ello se han llevado a cabo exámenes visuales de las piezas y de la metodología de trabajo, así como observaciones metalográficas y medidas de dureza de las placas de asiento. Se concluye que las condiciones de trabajo son muy exigentes, no existiendo ninguna fundición férrea que pueda prestar un servicio por tiempo indefinido. Se aconseja usar una fundición similar a la actual, pero ligeramente aleada, modificando el diseño y proceso de fabricación, y mejorando la operación del moldeo de los moldes.

Abstract. Grey and nodular cast-iron bottom plates and side frames, used to cast copper anode moulds, had experienced a severe deterioration. Failure analysis (visual inspection, metallographic studies and hardness measurements) has been carried out. It is concluded that there is no cast iron material, which could withstand the severe service conditions. The use of a lightly-alloyed grey cast iron is proposed, and modifications in mould design and production processing of bottom plates are suggested. Some recommendations are also made to improve the operation of copper anode mould casting.

1. INTRODUCCIÓN

Placas de asiento y marcos utilizados, en una planta de obtención de cobre, para el moldeo de moldes de ánodos de cobre experimentaban deterioro prematuro en servicio. El material del molde metálico, según se nos indica, era de fundición férrea y el material moldeado, cobre anódico de pureza 99,5%Cu. Estos moldes de cobre sirven, a su vez, para colocarse en las ruedas de moldeo para la obtención de los ánodos de cobre (Fig. 1).



Fig. 1. Vista parcial del moldeo de ánodos de cobre.

Los ánodos pesan normalmente unos 350 kg, son de forma aproximadamente cuadrada, de espesor 4-5 cm, siendo el área de una de las caras de alrededor de 1 m². Los ánodos moldeados están dotados de unas patillas para poder suspenderlos en las cubas electrolíticas. La

parte central de la placa de asiento tiene una forma tal que es un positivo de los ánodos de cobre. En adelante, la parte central de la placa sobresaliente, que conformará el ánodo, se designará como “ánodo”. El material de la placa de asiento, debido a su comportamiento insatisfactorio, se ha fabricado en diversos materiales férreos, en particular, en las fundiciones alemanas GG-20 y, más recientemente, en la GGG-40.



Fig. 2. Placa de asiento y marcos montados para su uso.

La figura 2 muestra la placa de asiento y los marcos montados para su uso. Los espacios que quedan entre las distintas piezas que componen el molde, se sellan con un material refractario. Tras un precalentamiento hasta 240°C, se cuela el cobre anódico a una temperatura entre 1170 y 1240°C. Según se nos

informa, las placas y los marcos fabricados en GG-20 tienen una duración media de 260 días, fallando principalmente por agrietamiento superficial generalizado. Por su parte, los fabricados en la nueva aleación GGG-40 se comban al cabo de unos 160 días, por lo que dejan de prestar su función debidamente.

2. OBSERVACIONES VISUALES

El defecto fundamental que presentan los marcos y placas de asiento de GG-20 es la aparición, al cabo de un cierto número de fusiones, de un agrietamiento generalizado, tanto en la placa de asiento (Fig. 3), como en la cara interna de los marcos (Fig. 4). Este fenómeno se traduce, en las esquinas y bordes de la placa, en la formación de grietas groseras (Fig. 5). Todos estos defectos quedarán calcados en los ánodos finales.

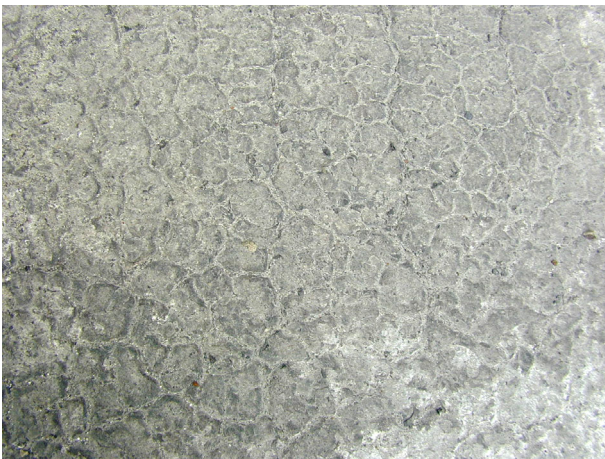


Fig. 3. Agrietamiento en retícula (cuarteado) en una placa de asiento GG-20.



Fig. 4. Agrietamiento en retícula de los marcos de fundición GG-20.

Es curioso hacer notar que el agrietamiento en retícula no aparece en la placa de asiento en la zona comprendida entre el “ánodo” y los marcos laterales.

La aparición de los defectos descritos en la fundición GG-20 llevó a los técnicos de la empresa a la sustitución de esta fundición por la fundición esferoidal GGG-40. La nueva fundición posee mayor resistencia a la tracción, no ha mostrado el agrietamiento descrito anteriormente, pero tras aproximadamente 160 días de uso, como se ha indicado, las placas sufren un comado. Es decir, se produce una flexión que origina una superficie cóncava sobre el “ánodo”. Esta deformación se aprecia claramente en la figura 6.



Fig. 5. Agrietamientos en los bordes del “ánodo” de una placa de GG-20.



Fig. 6. Placa de GGG-40 combada por el uso.

3. ENSAYOS

Se han llevado a cabo diversos estudios metalográficos y medidas de dureza.

La microestructura de la placa fabricada en fundición GG-20 corresponde a una fundición gris ferrítica con un pequeño contenido de perlita, no superior al 15%, aproximadamente. El grafito está en forma de láminas, distribuidas en agrupaciones radiales (forma I, tipo B, según UNE-EN ISO 945:1996). El tamaño de las láminas es relativamente uniforme en todas las muestras

preparadas y corresponde al valor 3, según la Norma mencionada.

Esta fundición presenta un elevado grado de oxidación superficial que, en el centro del “ánodo”, se extiende hacia el interior del mismo. Metalográficamente se ha podido comprobar que la oxidación penetra incluso a más de 30 mm de profundidad. La oxidación encuentra un camino preferente de penetración a través de las láminas de grafito. Una fotomicrografía de las mencionadas estructuras de oxidación se incluye en la figura 7. Se aprecia que las láminas de grafito y parte del material adyacente han desaparecido casi por completo, habiendo sido sustituidos por óxidos o, simplemente, por huecos. La estructura de la matriz, en la foto de la Fig.7, es totalmente ferrítica.

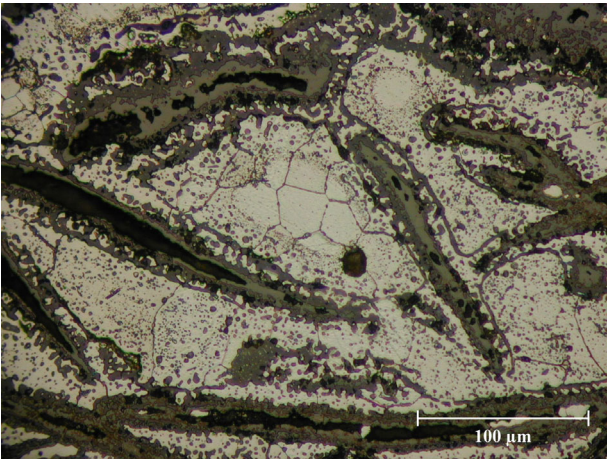


Fig. 7. Aspecto de la oxidación de la fundición GG-20 inmediatamente bajo la superficie. Corresponde a una muestra preparada a partir de las esquinas del “ánodo”.

Es curioso que, en contra de lo esperado, el tamaño de grano ferrítico es ligeramente mayor a mayores profundidades, es decir, lejos de la zona de vertido del caldo.

Por su parte, la fundición GGG-40 muestra la estructura típica de una fundición esferoidal ferrítica. Sólo excepcionalmente puede observarse alguna laguna perlítica. El grafito está en forma de nódulos esferoidales (forma VI, según UNE-EN ISO 945:1996).

Respecto al estudio de la alteración de la microestructura por efecto del servicio, se ha podido comprobar que la penetración de la oxidación es mucho menor en la fundición GGG-40 (Fig. 8), llegando hasta una profundidad máxima de unos 2 mm. La morfología globular del grafito dificulta, en comparación con la estructura laminar del grafito en la fundición GG-20, la difusión del oxígeno hacia el interior de la fundición GGG-40. Este fenómeno justifica, al menos parcialmente, el menor cuarteamiento que experimentan las placas de este material.

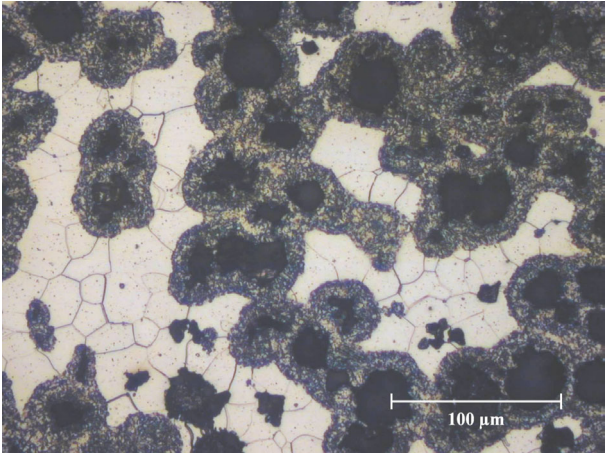


Fig. 8. Aspecto de la oxidación de la fundición GGG-40 inmediatamente bajo la superficie.

El tamaño de grano ferrítico, así como el de los nódulos de grafito, es claramente menor en la superficie que a mayores profundidades (Tabla 1). La heterogeneidad estructural observada (tamaños de grano y nódulos) es mucho más intensa que en la fundición GG-20. Esta heterogeneidad estructural de ambas fundiciones tiene probablemente su origen en las distintas velocidades de enfriamiento de las placas de fundición férrea, durante su fabricación. Al descansar la base de la placa sobre el suelo, la velocidad de enfriamiento debe haber sido menor en la parte inferior. De ahí, el mayor tamaño de grano ferrítico y, en el caso de la fundición esferoidal, además, el mayor tamaño de los nódulos (Tabla 1).

Tabla 1. Tamaño de grano ferrítico y de nódulos de la fundición GGG-40 a distintas profundidades en muestras del centro de los “ánodos”.

Profundidad, mm	0	20	50	23	26	28
Tamaño ferrita *	8	7/8	4/5	4/5	4	3/4
Tamaño nódulo†	5/6	5	4/5	4	3/4	3/4

* Según UNE 7280:1972. † Según UNE-EN ISO 945:1996.

En lo que respecta a las medidas de dureza, en la Tabla 2 se incluyen los valores encontrados, para las dos fundiciones, a distintas profundidades. También se incluyen los valores de las resistencias a la tracción (R_m) que deben corresponder a dichos valores de dureza.

La dureza de la fundición esferoidal GGG-40 es superior, lo que es acorde con la mayor resistencia a la tracción especificada para la misma. Considerando el fuerte espesor de la placa de asiento, los valores medidos son normales para las fundiciones GG-20 y GGG-40, respectivamente. Los valores de resistencia se han obtenido de la normativa y bibliografía para

fundiciones de grafito laminar y esferoidal no aleadas, en función de su dureza [1-3].

Tabla 2. Dureza y resistencia a la tracción de las fundiciones GG-20 y GGG-40 a distintas profundidades.

Profundidades aproximadas	GG-20 *		GGG-40 †	
	HB	R _m , MPa	HB	R _m , MPa
Superficie “ánodo”	100	≤ 100		≤ 300
10 mm	101		120	
30 mm	98		124	
50 mm	105			
265 mm			123	
275 mm			124	

* Muestra de una de las esquinas del “ánodo” (HB 62.5/2.5/10).

† Muestras del centro del “ánodo” (HB 187.5/2.5/30).

4. MECANISMOS DE LOS FALLOS

4.1. Fundición gris GG-20

El fallo más notable es el agrietamiento en retículos o tramas desordenadas, conocido en inglés como “crazy cracking”, es decir, un agrietamiento sin orden. Este agrietamiento es típico de las fundiciones férreas, cuando se calientan y enfrían repetidamente a través de la zona de transformación de fases. El agrietamiento se origina por las tensiones alternadas de dilatación y contracción, que aparecen como resultado de dicha transformación. El cuarteado es el resultado de una fatiga térmica, causada por las mencionadas tensiones térmicas cíclicas. A la aparición de tensiones cooperan también la grafitización de los carburos de hierro y la oxidación interna del hierro, principalmente a través de las láminas de grafito. La fundición gris, donde el grafito está en forma de láminas, se oxida de esta forma más fuertemente que la fundición esferoidal.

Además de los mecanismos anteriores, en piezas de fundición que se calientan y enfrían repetidamente, se originan tensiones, también, por las dilataciones y contracciones del material metálico, debido a los meros calentamientos y enfriamientos no homogéneos. Los gradientes de temperatura dependen principalmente de la brusquedad de los cambios térmicos, del espesor de la pieza y, de manera muy importante, de la conductividad térmica del material. Las tensiones originadas están ligadas al coeficiente de dilatación del material y a sus parámetros elásticos, en particular, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Finalmente, la posibilidad de que ocurra una rotura superficial o total del material depende de su resistencia a la fractura. La fundición GG-20, con grafito laminar, tiene una mejor conductividad térmica que la GGG-40, con grafito esferoidal. Así a 100°C, la conductividad térmica del la

fundición gris es de aproximadamente 53.3 W K/m frente a 32.3, para la fundición esferoidal [4]. Por tanto, la primera de ellas desarrollará menores gradientes térmicos. Sin embargo, la resistencia a la fractura es menor en la fundición GG-20 que en la GGG-40, lo que explica que esta última no haya sufrido cuarteamiento.

El hecho de que los marcos laterales y la zona de “ánodos” de las placas se hayan cuarteado y no así el resto de la placa que circunda al “ánodo” podría explicarse porque los marcos y “ánodos” han sufrido mayores tensiones térmicas, resultantes de haber estado sometidos a mayores gradientes de temperatura. Este mayor gradiente de temperatura se ha originado, en el caso de los marcos, porque no han sido precalentados. Este precalentamiento se lleva a cabo en el caso de la placa desde la parte inferior. Sin embargo, en la zona de la placa correspondiente a la posición del “ánodo”, el espesor (288 mm) es superior al de la zona de la placa circundante (213 mm). Esto da lugar a que el gradiente térmico durante la colada sea mayor. También colabora a incrementar el gradiente térmico el vertido directo del cobre líquido sobre la región del “ánodo”, que hace que el calentamiento originado por el cobre líquido sea superior en esta región que en la zona de la placa circundante.

Otro fenómeno de gran interés para el uso de materiales metálicos a alta temperatura es la termofluencia o *creep*, en virtud de la cual los materiales experimentan cambios dimensionales que tienen lugar poco a poco, bajo condiciones de carga en la región elástica. En el caso de la fundición férrea, el grado de resistencia a la termofluencia depende de la composición química y de las características microestructurales de la fundición. No se ha observado que la termofluencia haya sido la causa del fallo de la placa de asiento.

4.2. Fundición esferoidal GGG-40

El fallo de la placa de asiento se manifiesta por un combado de la zona del “ánodo”, cuya superficie queda con forma cóncava. No se han detectado fenómenos de agrietamiento o de deformación plástica propiamente dicha. La explicación más plausible es que el combado ha sido originado por relajación de tensiones elásticas. Estas tensiones se originan por calentamientos y enfriamientos no homogéneos. Estas tensiones pueden haber aparecido durante el proceso de fabricación de las placas. Durante la solidificación de las placas, las contracciones no uniformes, en distintas zonas, de la fundición pueden ocasionar en la superficie superior de los “ánodos” tensiones tangenciales de tracción residuales, que se relajan durante el servicio de las placas, originando la mencionada superficie cóncava. Por otra parte, los mismos calentamientos y enfriamientos no homogéneos que tienen lugar durante el servicio de las placas, pueden dar lugar a la introducción de tensiones. La intensidad de estas tensiones, para un mismo ciclo operativo térmico, depende de ciertas características del material, en particular, de la conductividad térmica, del coeficiente de dilatación y del módulo de elasticidad, estando

limitado su valor máximo por el límite elástico. En la fundición esferoidal considerada, GGG-40, en comparación con la fundición gris, GG-20, la conductividad térmica es inferior y el módulo de elasticidad, y el límite elástico son mayores [1-3]. Estos tres factores coinciden en hacer la fundición esferoidal más susceptible a sufrir tensiones residuales altas, cuando experimentan cambios de temperatura inhomogéneos.

5. CONSIDERACIONES FINALES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general, se considera que la temperatura límite de uso seguro de una fundición férrea es de unos 425-450°C. En el caso que nos ocupa, la fundición ha de estar en contacto con el cobre fundido a temperaturas de aproximadamente 1170-1200°C. Es interesante recordar, a este respecto, que la temperatura nominal de fusión de la mayoría de fundiciones férreas es de aproximadamente 1150°C.

A altas temperaturas, hay varios fenómenos que contribuyen al deterioro o fallo de una fundición, entre los cuales se encuentran el hinchamiento y oxidación de la fundición, que produce cambios dimensionales, la termofluencia, que origina una deformación lenta, pero permanente, y la fatiga térmica, que da lugar a agrietamientos o roturas. En la intensidad de la aparición de estos fenómenos influyen diversos parámetros, entre ellos, la conductividad térmica, las características elásticas, como el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y otros. Desgraciadamente, no hay ninguna fundición en que coincidan positivamente todos los parámetros que son beneficiosos, por ejemplo, la fundición gris ferrítica tiene muy buena conductividad térmica, pero su resistencia a la tracción es baja. Lo contrario ocurre en la fundición esferoidal. Esto lleva a la conclusión de que no existe una fundición ideal para el uso como placa y marco. Por ello, cualquier solución que se adopte es consecuencia de un compromiso de elección de factores positivos y negativos.

En base a la experiencia acumulada en el uso de fundiciones férreas a alta temperatura [3, 5-10], se propone, como primera opción, para fabricar las placas y marcos una fundición gris, ligeramente aleada, para uso a elevadas temperaturas, que cumpla las características siguientes:

Composición química:

- Carbono: alto contenido, 3.5%C mínimo
- Silicio: más bien bajo, 1.8%Si como máximo
- Fósforo y azufre: lo más bajo posible, 0.10% como máximo
- Cromo: 0.50%Cr mínimo
- Molibdeno: 0.40%Mo mínimo

Propiedades mecánicas:

- Dureza: entre 200 y 260 HB
- Resistencia a la tracción: 240 MPa mínima

Como se ha indicado anteriormente, no existe una fundición ideal para estos usos, por lo que la fundición propuesta es un compromiso entre diversos factores, positivos y negativos. La fundición elegida se hace con la intención de no forzar un cambio de proveedor, es decir, de continuar con un fundidor que elabora fundiciones férreas relativamente comunes. Se podría proponer todo un rosario de fundiciones, tales como fundiciones esferoidales aleadas con molibdeno, fundición de grafito compacto o vermicular (estas fundiciones poseen, por cierto, una buena combinación equilibrada de propiedades térmicas y mecánicas), u otras muy cargadas en elementos de aleación, como la fundición inglesa Silal, fundiciones austeníticas, Nicrosilal, y fundiciones ferríticas de alto contenido en cromo.

Es muy importante remarcar que el rendimiento final de las placas no sólo depende del material de que están hechas, sino del diseño de las mismas, el método de fabricación y de la operativa durante el servicio en planta. A continuación se analizan, con más detalle, estos aspectos.

Diseño de las placas

El espesor de la placa, tanto en la zona central del “ánodo” como en la parte circundante debería ser el mismo, con el fin de disminuir las heterogeneidades térmicas y, en consecuencia, tensionales. Esto exige un vaciado de la parte inferior de la zona de “ánodo”, que, eventualmente, puede reforzarse con nervios. Además, cualquier cambio de sección o esquina, debe estar diseñado de forma que el acoplamiento ocurra con el mayor radio de acuerdo, es decir, evitando la existencia de ángulos que puedan ser lugares de concentración de tensiones y, por consiguiente, causa de agrietamientos. Así mismo, esto facilitaría el despegue de la pieza moldeada del molde. Por otra parte, es posible que se pudiera disminuir el espesor general de la placa, aumentando para ello la superficie de apoyo o sustento de las mismas.

Fabricación de las placas

Debe pedirse al fabricante de las placas que el sistema de alimentación de los moldes y, muy especialmente, del enfriamiento de las piezas, se realice de forma que dicha velocidad sea lo más lenta y homogénea posible, con el fin de disminuir la aparición de tensiones residuales. (Por supuesto, la disminución o eliminación de tensiones residuales puede hacerse mediante un tratamiento de distensionado o, incluso, de recocido, en su caso; pero, sin duda, estos tratamientos supondrían un aumento del costo).

Operativa de la preparación de los moldes de ánodos

En primer lugar, para disminuir la brusquedad de los cambios de temperatura se debe realizar un precalentamiento, controlado con termopares, tanto de la placa como de los marcos a unos 240°C. Es aconsejable que el calentamiento de la placa se haga, no sólo por la parte inferior sino también por la superior,

bien con mecheros o con una manta térmica. El uso del calentamiento superior de la placa también ayudaría a poder utilizar una temperatura inferior de colada del cobre líquido. En relación a la temperatura de colada, debería ser la menor posible, compatible con la conveniente fluidez del caldo para que pueda extenderse por toda la placa. Una vez determinado el valor óptimo, la temperatura de colada debe controlarse entre $\pm 15^{\circ}\text{C}$ de dicho valor. A la amortiguación del choque térmico al verter el cobre líquido sobre la placa podría contribuir la colocación en la zona del “ánodo” de una chapa delgada de cobre, que, al licuarse, enfriaría el líquido. Esta chapa de cobre podría ser una chapa normal, un cátodo de cobre o el esqueleto de un ánodo procedente de la *tank house*. A este mismo fin se recomienda el uso de un recubrimiento aislante, de un espesor de hasta 0,8 mm, que contenga silicato sódico, mica, talco y caolín [8]. Este recubrimiento, en forma de suspensión en agua, se puede aplicar por aspersión (spraying), procurando que el molde esté lo suficientemente caliente (200 o 250°C), para evaporar el agua inmediatamente.

Por otra parte, con el fin de mitigar la acción mecánica sobre las mismas regiones de la placa, sería aconsejable no hacer siempre el levantamiento del molde de ánodos por el mismo lado, sino ir alternando los sitios, es decir, si se ha levantado por un determinado lugar, la próxima vez levantar el molde por el lado opuesto. (Todo ello siempre que sea viable desde el punto de vista operativo). A este respecto, es conveniente controlar dimensionalmente la placa de asiento para comprobar que los ángulos de salida para el desmoldeo sean, al menos, de 5° .

REFERENCIAS

- [1] Fundición. Fundición gris. EN 1561 (1997).
- [2] Fundición. Fundición de grafito esferoidal. EN 1563 (1997).
- [3] ASM Metals Handbook, Vol. 1, Metals Park, OH (1990).
- [4] Sergeant, G.F. and Evans, E.R., The British Foundryman, May, 115-121 (1978).
- [5] Angus, H.T., Cast Iron: Physical Engineering Properties, 2nd edition, Butterworths, London (1976).
- [6] Techniques de l'Ingénieur, Métallurgie, M400, Paris (1981).
- [7] Gray Iron Castings for Elevated Temperatures for Non-Pressure Containing Parts, ASTM A319 – 71 (Reapproved 1985).
- [8] Elevated Temperature Properties of Cast Irons, SAE Information Report J125, May (1988).
- [9] ASM Metals Handbook, Vol.15, Metals Park, OH (1988).
- [10] FONTORAMA, CIFOM (Centre d'Information des Fontes Moulées), Paris (1991).