
TRATAMIENTO DE MODIFICACION EN EL MOLDE DE ALEACIONES BASE Al-Si

C. GONZALEZ, A. GARCIA, H. CRUZ, A. FLORES, A. SANCHEZ, I. BELTRAN, C. ATLANTECO (1) y J. JUAREZ (2)

Univ. Nacional Autónoma de México, (1) Fac. de Química, Depto. Ingeniería Metalúrgica, (2) Inst. de Investigación en Materiales, Ciudad Universitaria, Circuito Interior, Del. Coyoacán, 04510 México, D.F. - México

RESUMEN

Se desarrolló un nuevo método de modificación del eutéctico aluminio-silicio que emplea sales de sodio. Este método elimina el problema de decaimiento asociado con la modificación convencional en la cuchara. Se discute la fundamentación así como algunos aspectos relacionados con su aplicación. También se muestran los resultados de pruebas realizadas en planta industrial. Se compara el nuevo método con los métodos convencionales de modificación que emplean aleaciones maestras de estroncio y sales de sodio. Los resultados experimentales muestran que la aplicación de este método es factible en condiciones de interés industrial. Por lo tanto, puede ser considerado como una alternativa eficiente para modificar la morfología del eutéctico durante la manufactura de piezas coladas de aleaciones aluminio-silicio.

IN-MOLD MODIFICATION TREATMENT OF Al-Si ALLOYS

ABSTRACT

A new method for the modification of aluminium-silicon eutectic using sodium salts has been developed. The proposed method eliminates the problem of fading associated with the conventional modification in the ladle. The fundamentals of the method and some relevant aspects related to its industrial implementation are discussed. Also, the results obtained in an industrial plant. The new method is compared with the industrial data in which conventional modification using strontium master alloys and sodium salts are used. The experimental results shows the feasibility of application of the method under industrial conditions. Therefore, the proposed method may be considered as an efficient alternative for the modification of the eutectic during the production of aluminium-silicon sand cast alloys.

Keywords: aluminium-silicon alloy, modification in mold, eutectic, cast alloy

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones Al-Si constituyen la familia de aleaciones ligeras más empleada en la manufactura de piezas mediante el proceso de fundición, debido a su buena colabilidad y a sus excelentes propiedades mecánicas asociadas a un bajo peso, características que son buscadas cada vez más por la industria automotriz y aeroespacial (Paray, 1994). Las aleaciones Al-Si más empleadas son las hipoeutécticas. Estas aleaciones presentan como microconstituyentes principales a una solución sólida rica en aluminio, que adopta la forma de dendritas equiaxiales y en las regiones interdendríticas e intergranulares al eutéctico irregular Al-Si (Backerud, 1990). En estas aleaciones, el microconstituyente eutéctico presenta a la fase Si bajo la forma de placas aciculares, lo cual provoca que la pieza exhiba propiedades mecánicas pobres.

Uno de los desarrollos que ha permitido mejoras considerables en las propiedades mecánicas de estas aleaciones, y con esto, su ingreso al grupo de aleaciones de mayor aplicación comercial, es el tratamiento de modificación, el cual es un tratamiento del metal líquido que consiste en incorporar a la aleación pequeñas cantidades de agentes químicos llamados modificadores, los cuales cambian la morfología del Si en el microconstituyente eutéctico, produciendo una notable mejora en las propiedades mecánicas del producto sólido y en la respuesta al tratamiento térmico.

Los agentes modificadores más comunes son el sodio, el estroncio y el antimonio, aunque sólo el sodio y el estroncio han encontrado una amplia aceptación en América, ya que el antimonio presenta diversos inconvenientes, entre los cuales destacan el peligro que representan los gases tóxicos que eventualmente pueden producirse durante su empleo en planta y su incompatibilidad, durante el reciclamiento, con chatarras que contienen sodio y estroncio disueltos (Hurley, 1985).

El tratamiento convencional de modificación se realiza en el horno o en la olla de vaciado y consiste en agregar una cantidad preestablecida de agente modificador al baño metálico. La cantidad a adicionar se determina experimentalmente en función de la masa de metal a tratar y con el fin de obtener los niveles deseados de modificación.

Cuando se emplea al Na como modificador, ya sea como sales, ó como Na metálico empacado al alto vacío, se requiere de contenidos de Na disuelto que oscilan entre las 20 y las 150 ppm para alcanzar niveles óptimos de modificación. En el caso del empleo de Sr, la cantidad necesaria de Sr disuelto para lograr resultados adecuados de modificación, se ubica entre 80 y 250 ppm (Garat et al, 1992).

Comparando al Na y al Sr como agentes modificadores, en condiciones óptimas de tratamiento, se ha encontrado que el Na produce una modificación

mas efectiva, y una menor tendencia a la formación de porosidad (Gruzleski, 1992). Sin embargo, dada su gran tendencia a escapar del baño metálico, debido a su elevada presión de vapor y a los problemas en el control de la modificación que de ahí se desprenden, su empleo como agente modificador para el tratamiento de modificación en la olla se ha visto desplazado por el uso de Sr, (Pan et al., 1994), el cual facilita una mayor reproducibilidad y control de los niveles de modificación obtenidos en las aleaciones tratadas.

Si se analiza lo anterior, se puede encontrar que la principal razón que limita el empleo del sodio como modificador, radica en su elevada presión de vapor cuando se encuentra disuelto en el baño metálico, y en los tiempos variables de permanencia en la cuchara, asociados al proceso convencional de modificación en la olla.

Estos problemas son eliminados cuando se emplea el procedimiento de modificación propuesto en este trabajo, al que se ha denominado modificación en el molde, (MIN), y el cual consiste básicamente en incluir, como parte del sistema de colada, a una cámara de reacción en donde se ubica una cantidad predeterminada de sal modificadora, de tal modo que la corriente de metal líquido que se dirige hacia la impresión de la pieza, sea modificada durante su paso por el sistema de colada.

Se han realizado diferentes experiencias a nivel laboratorial, en instalaciones propias y en planta bajo condiciones normales de producción empleando aleaciones A356 y A319.2 con resultados satisfactorios (García et al., 1991, 1993).

En este trabajo se discuten los aspectos más relevantes asociados a este proceso y se muestran los resultados de pruebas preliminares de implementación en planta, los cuales indican el gran potencial de aplicación de esta nueva técnica.

MODIFICACIÓN EN EL MOLDE

En esencia, el método de modificación en el molde (MIN) consiste en incluir, como parte del sistema de colada, a una cámara de reacción que se sitúa justo por debajo de la bajada y en donde existe una cantidad preestablecida de sales de sodio (Fig.1).

En base a las observaciones realizadas durante la implementación de este proceso, se encuentra que cuando el chorro metálico ingresa a la cámara de reacción, entra en contacto con la sal y la proyecta hacia las paredes de la cámara, de tal modo que éstas quedan cubiertas de una capa reactiva de agente modificador.

A medida que el flujo metálico pasa a través de la cámara, la aleación se enriquece en sodio, y el efecto final que se observa en las piezas producidas empleando esta técnica es la presencia de

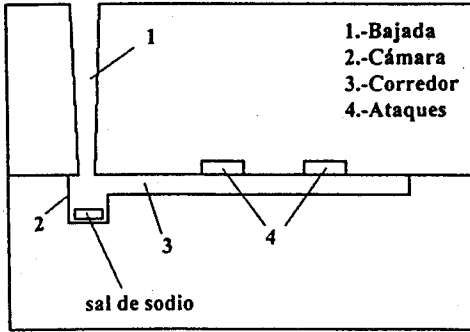


Fig. 1: Representación esquemática del Proceso de Modificación en el molde

un nivel específico de modificación del eutéctico Al-Si.

Uno de los aspectos más importantes de este proceso es el dimensionamiento y diseño de la cámara de reacción. No menos importante es la determinación de la cantidad de sal modificadora que se requiere para obtener los niveles de modificación deseados. Ambos aspectos se discuten a continuación.

Fundamentación

En las piezas producidas mediante el proceso MIN y debido al mezclado que se produce en el metal líquido conforme la impresión de la pieza se llena, lo que se observa en el producto sólido es un nivel de modificación promedio, al cual se le puede asociar una cierta cantidad de sodio disuelto.

A su vez, la cantidad de sodio disuelto es el resultado del flujo másico de Na que fue incorporado al torrente metálico durante el paso del metal líquido a través de la cámara de reacción, en el tiempo en que se realizó la operación de llenado

Con el fin de establecer una primera aproximación para describir matemáticamente a la transferencia de masa que se efectúa en el sistema bajo estudio, se puede suponer un coeficiente de transferencia de masa con un valor representativo, el cual resulta de un promedio de los valores instantáneos de dicho coeficiente durante el tiempo en que el chorro metálico circuló a través de la cámara de reacción. De acuerdo con lo anterior, el flujo másico promedio de sodio, J_{Na} (Kg/s), que fue realizado durante el llenado de la pieza puede expresarse de la siguiente manera:

$$J_{Na} = \bar{h}_{Na} A_i (C_{Na}^* - C_{Na}^B) \quad (1)$$

donde:

\bar{h}_{Na} es el coeficiente promedio de transporte de masa (Kg/m²s).

A_i es el área transversal interna de la cámara de reacción (m²).

C_{Na}^* es la concentración de sodio en el líquido en contacto con la capa reactiva de sal modificadora (% en peso).

C_{Na}^B es la concentración de sodio en el chorro metálico que ingresa a la cámara de reacción (% en peso).

En el caso de interés en este trabajo, la cantidad original de sodio disuelto en el metal que entra a la cámara de reacción es nula, por lo que la ecuación (1) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$J_{Na} = \bar{h}_{Na} A_i (C_{Na}^*) \quad (2)$$

de (2) se desprende que la masa total de sodio incorporado en metal líquido tratado es:

$$m_{Na} = \bar{h}_{Na} A_i (C_{Na}^*) t_c \quad (3)$$

donde:

t_c es el tiempo de colada (s)

m_{Na} es la masa de sodio (Kg) que se incorporó en la masa total de metal tratado

De la ec. (3) se desprende que la cantidad de sodio disuelto en la pieza, en porcentaje en peso, puede calcularse con la siguiente expresión:

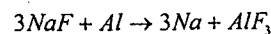
$$(\% Na) = \frac{\bar{h}_{Na} A_i (C_{Na}^*)}{\rho_M Q_v} \quad (4)$$

donde:

ρ_M es la densidad (Kg/m³)

Q_v es el gasto volumétrico promedio de la aleación líquida (m³/s).

El valor de la concentración de sodio en el líquido en contacto con la capa reactiva de sal modificadora depende de la fisicoquímica de la reacción de disolución de la sal de sodio en el baño metálico. En el caso particular de la sal modificadora empleada en este trabajo, constituida principalmente por NaF se ha propuesto la siguiente reacción de disolución:



Para calcular, a partir de principios fundamentales la evolución de la concentración de sodio en el

líquido en contacto con la capa reactiva de sal modificadora durante el llenado del molde se requiere conocer la termodinámica y la cinética de esta reacción. Sin embargo, y con el fin de llegar a una expresión ingenieril que permita el dimensionamiento de la cámara de reacción, se puede suponer que existe durante el llenado un valor que representa un promedio de los valores actuantes de este parámetro durante el funcionamiento de la cámara.

Reagrupando los parámetros \bar{h}_{Na} y C_{Na}^* de la ec.(4), se obtiene una expresión semiempírica que relaciona a la cantidad de sodio disuelto en la pieza con las condiciones de llenado del molde y con las dimensiones de la cámara de reacción:

$$(\%Na) = \frac{(K_s)A_i}{\rho_M Q_s} \quad (5)$$

donde K_s es el coeficiente de disolución de la sal ($\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}$), el cual depende de la temperatura y de las condiciones hidrodinámicas presentes en la cámara durante el tratamiento MIN y puede ser determinado experimentalmente para condiciones específicas de llenado y dimensiones de la cámara.

La cantidad de sodio disuelta que permite alcanzar niveles de modificación aceptables puede ser ubicada en un cierto intervalo de (%Na). K_s también varía dentro de un cierto rango para una altura metalostática fija (es decir para cada caja estandarizada de molde) y en función de la temperatura de colada.

Podemos agrupar estos dos parámetros en un factor de diseño, al que se le ha llamado factor de incorporación, F.I., el cual relaciona al área interior de la cámara con el gasto volumétrico promedio presente durante el llenado del molde a fin de que se obtengan los niveles requeridos de modificación:

$$F.I. = \frac{\rho_M (\%Na)}{K_s} = \frac{A_i}{Q_s} \quad (6)$$

Experimentalmente se puede establecer un intervalo de valores de F.I. en donde se encuentre el valor óptimo que permite la obtención de los resultados de modificación deseados en la pieza y a este respecto, se ha encontrado que en la mayor parte de los casos analizados el intervalo de valores a considerar durante las pruebas de implementación del proceso MIN se encuentra entre $F.I.=12$ y $F.I.=25$.

La cantidad de sal de sodio que se coloca en la cámara de reacción depende de la cantidad de metal

a tratar y debe ser determinada experimentalmente. En este trabajo, fué empleado un modificador comercial pulverizado (Nucleant 363, FOSECO), en cantidades que van del 0.2% al 0.5% en peso con respecto al peso de la pieza a tratar, incluyendo al sistema de colada.

La implementación de este proceso requiere, como la mayor parte de los aspectos relacionados con la fundición, de pruebas preliminares, las cuales son realizadas con el fin de definir los ajustes requeridos en planta para la obtención de los resultados deseados en piezas específicas.

Estos ajustes pueden ser de dos tipos. El primer tipo de ajuste se refiere a cambios en el volumen de la cámara y/o en la cantidad de sal modificadora ahí presente y se aplica cuando el nivel de modificación no es el adecuado.

El segundo tipo de ajuste se refiere al rediseño del sistema de colada y se aplica cuando se obtienen niveles adecuados de modificación, pero existe la presencia de excesiva porosidad en la pieza. A este respecto cabe señalar que los mejores resultados se obtienen cuando se emplean sistemas de colada híbridos con una relación de colada 1: X: 1, donde X, que es el cociente del área transversal del corredor y el área de la bajada justo antes de la cámara, Fig.1, adopta valores entre 2 y 3.

La cámara de reacción se ubica directamente por debajo de la bajada, de tal manera que la cámara y el corredor se sitúan en la mitad inferior del molde de arena, Fig.1, mientras que la copa de colada, la bajada y los ataques se ubican en la mitad superior del molde. Para el diseño de los componentes que forman al sistema de colada se deben seguir los criterios de diseño y dimensionamiento especificados para el caso de aleaciones oxidables, con el fin de minimizar las condiciones de atrapamiento de gases (AFS,1994).

EXPERIMENTACIÓN

El caso bajo estudio se presenta en la Fig. 2. La placa modelo consiste de 6 impresiones, Fig. 2a, de una pieza denominada tapa, Fig 2b. El peso de cada tapa es 200 g y el peso de metal en el molde incluidos el sistema de colada y los alimentadores es 1.650 Kg.

Se realizaron pruebas preliminares en instalaciones propias para establecer el sistema de colada, las dimensiones de la cámara y la cantidad de sal de sodio a emplear, siguiendo la metodología descrita a continuación:

(1) Determinación del tiempo de colada tomando como base el espesor crítico de la pieza y la temperatura de colada.

(2) Cálculo del gasto volumétrico promedio de metal durante la operación de llenado del molde.

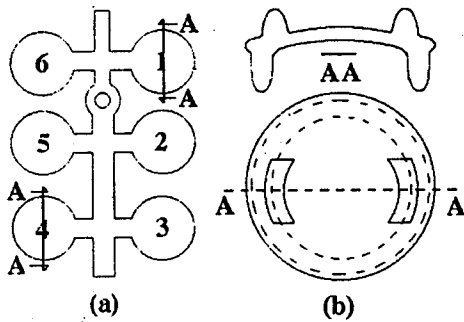


Fig. 2: Representación esquemática del caso bajo estudio

(3) Cálculo de las dimensiones de la cámara de reacción.

(4) Dimensionamiento del sistema de colada.

(5) Determinación de la cantidad de sal modificadora a colocar en la cámara de reacción

(6) Realización de pruebas de ajuste de las condiciones de operación de la cámara.

(7) Propuesta final de sistema MIN.

Una vez establecidas las características del sistema MIN que proporciona los niveles adecuados de modificación en las piezas de interés, se procedió a efectuar una serie de pruebas en la línea de producción.

La experimentación realizada consistió en colar 16 moldes directamente en la línea de producción de los cuales uno no fue modificado, cinco se trataron por modificación en el molde (MIN) utilizando un modificador comercial a base de sales de sodio, cinco más se trataron por modificación convencional en la cuchara con sales base sodio y finalmente, cinco se trataron con aleación maestra de estroncio (Al-10% Sr), que es el método que se utiliza actualmente en la planta.

Los moldes se fabricaron con moldeadoras semi-automáticas, utilizando una mezcla de arena en verde de granulometría AFS 80-90 Oklahoma, con 5% de bentonita y 2.5% de humedad, que es la mezcla utilizada durante el proceso normal.

En el caso de los moldes tratados mediante modificación convencional con sales de sodio en la cuchara, fue adicionada la cantidad de sal modificadora (Nucleant 363, Fosco) que corresponde a un 0.45 % en peso del metal tratado, mientras que, para los moldes donde fue aplicada la modificación en el molde, la cantidad de sal modificadora que fue colocada en la cámara de reacción corresponde con el % 0.40 en peso del peso total del metal en el molde, incluido el sistema de colada.

Tabla 1: Composición química de la aleación maestra Al-10 Sr, (% en peso).

%Si	%Fe	%P	%B	%Ca	%Sr	Al
0.2	0.3	0.01	0.1	0.03	10.0	balance

Tabla 2: Composición química de la aleación A356, (% en peso).

%Si	%Mg	%Fe	%Cu	%Zn	Al
6.8	0.2	0.6	0.1	0.1	balance

La composición química de la aleación maestra Al-10% Sr utilizada se indica en la tabla 1. La cantidad adicionada de aleación maestra para obtener el Sr residual adecuado y una buena modificación fue de 0.1% en peso del metal a tratar.

La composición química de la aleación utilizada, de tipo A356, se muestra en la tabla 2. La fusión fue realizada en un horno con crisol de SiC calentado por diesel con una capacidad de 300 Kg, el cual fue mantenido a una temperatura máxima de 760 °C. Para la desgasificación del baño fue introducida, durante los 10 minutos previos al llenado de moldes, una mezcla Ar-N₂.

Con el fin de determinar el nivel de modificación obtenido se realizó el análisis metalográfico de las piezas. Para tal efecto las piezas sometidas a metalografía fueron las numeradas como 1 y 4, como se indica en el esquema de la Fig. 2(a), las cuales fueron preparadas para observar toda la sección transversal, mostrada esquemáticamente en la Fig. 2(b). El nivel de modificación se evaluó mediante patrones comparativos, (CTIF, 1980), que consideran los siguientes niveles: (1) sin modificar, (2) mal modificada, (3) modificación incipiente, (4) modificación suficiente, (5) bien modificada, (6) supermodificada y (7) sobremodificada.

El porcentaje de porosidad se evaluó mediante patrones comparativos (CTIF, 1980) y fue corroborada mediante la medición de la densidad aparente, d_{ap} , empleando el método de Arquímedes y la siguiente expresión:

$$\% P = \left[\frac{(d_{max} - d_{ap})}{d_{max}} \right] \quad (7)$$

donde $d_{max} = 2680.7 \text{ Kg/m}^3$, es la densidad máxima asociada a la aleación A356 (Pan et al., 1994)

RESULTADOS

En la Fig. 3 se muestra una fotomicrografía representativa de la aleación sin modificar.



Fig. 3: Aleación A356 sin modificar (400X).



Fig. 6: Microestructura típica en piezas modificadas en el molde (MIN), (400X).



Fig. 4: Microestructura típica de piezas modificadas con aleación Al-10% Sr, (400X).

En las Figs. 4-6 se muestra las fotomicrografías representativas de las microestructuras presentes en la aleación modificada con Al-10% Sr. (Fig. 4), la aleación modificada con sales de sodio en la cuchara. (Fig. 5), y la aleación modificada usando el proceso MIN. (Fig. 6).

En las tablas 3, 4 y 5 se muestran los resultados metalográficos encontrados para los tres métodos de modificación.



Fig. 5: Microestructura típica en piezas modificadas en la cuchara con sales de Na, (400X)

Tabla 3: Piezas modificadas con aleación maestra Al-10%Sr.

No. de Molde	No de Pieza	Nivel de Modificación	% de Porosidad
1	1	5	1.1
1	4	5	1.4
3	1	4	3.1
3	4	4	3.4
6	1	4	5.1
6	4	4	5.5

Tabla 4: Piezas modificadas en la cuchara con sal base sodio.

No. de Molde	No de Pieza	Nivel de Modificación	% de Porosidad
6	1	5	0.5
6	4	5	1.0
8	1	5	1.0
8	4	5	1.5
10	1	5	0.5
10	4	5	1.0

Tabla 5: Piezas modificadas mediante modificación en el molde, MIN.

No. de Molde	No de Pieza	Nivel de Modificación	% de Porosidad
11	1	6	0.5
11	4	6	1.0
13	1	6	0.5
13	4	6	0.5
15	1	6	0.5
15	4	6	1.0

DISCUSIÓN

El análisis de los resultados presentados en las Tablas 3, 4 y 5 muestra que el nivel de modificación para las piezas tratadas con Al - 10%Sr es de 5 (bien modificadas) a 4 (suficientemente modificadas), mientras que para las piezas tratadas con sales de sodio, ya sea empleando el método con-

vencional ó el método MIN, el nivel de modificación es del orden de 5 (bien modificadas) a 6 (super-modificadas). Asimismo se puede observar que la porosidad presente en las piezas modificadas con Al - 10% Sr es mayor que la encontrada en las piezas tratadas en la cuchara y en el molde con sales base sodio (Figs. 3-6). Lo anterior corresponde con resultados previamente reportados en la literatura (Gruzleski, 1992), los cuales indican que el Na produce una modificación mas efectiva, y una menor tendencia a la formación de porosidad, cuando es comparado con el Sr.

Es interesante notar que el nivel de modificación obtenido en todos los moldes tratados mediante el proceso MIN es el adecuado para aplicaciones industriales y que la porosidad presente fue menor ó similar a la encontrada en el caso de los métodos convencionales de modificación lo cual indica que es factible aplicar el método MIN en las lineas de producción.

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales muestran que el empleo del método de modificación en el molde es factible en condiciones industriales. Asimismo estos resultados indican que la metodología de diseño de la cámara de reacción, y la metodología general de implementación del método MIN propuestos en este trabajo funcionan adecuadamente en las condiciones de interés industrial presentes durante la experimentación realizada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la DGAPA, UNAM, proyecto IN50-1596 el apoyo financiero para este trabajo y a Ma. Elena Olvera M, becaria del mismo por su participación en la preparación de este documento.

REFERENCIAS

AFS Gating and Riserling Worksheet, Course n° 7-250 Gating and Riserling, American Foundrymen's Society, 1994.

Backerud G., Solidification characteristics of aluminium alloys, AFS/Skan Aluminium, 1990.

CTIF, Atlas Metallografique des L A-S503, Centre Technique des Industries de la Fonderie (1980).

Garat M., Laslaz G., Jacob S., Meyer P., State of the art use of Sb, Na, and Sr modified Al-Si casting alloys, AFS Transactions: 100, 821-832, 1992.

García A., Atlatenco C., Beltrán I., Modification in the mould of an aluminium-5%Silicon Alloy, AFS Transactions: 90, 879-883, 1991.

García A., Gonzalez C., Atlatenco C., Aplicación del proceso MIN en condiciones industriales, Moldeo y Fundición, S.M.F: Año XV, n° 87, 1993.

Gruzleski J.E., The Art and Science of Modification: 25 years of Progress, AFS Transactions: 100, 673-683, 1992.

Hurley T., Effect of modification practice on aluminium A356 alloys, AFS Transactions: 93, 291-296, 1985.

Pan E.N., Cherng Y.C., Lin C.A., Chiou H.S., Roles of Sr and Sb on silicon modification of A356 aluminium alloys, AFS Transactions: 102, 609-629, 1994.

Paray F., Factors to consider in modification, AFS Transactions: 102, 883-891, 1994.