

Evaluación del efecto de modificadores y refinadores en el comportamiento mecánico y magnitud del rechupe de aleaciones Al-Si-Mg.

V. Lavaert*, M. Moors* , E. Wettinck*, R. Castañeda**, L. Goyos**.

*Laboratory Non Ferrous Metallurgy, Gent University, Technologiepark 9, B-9052 Zwijnaarde, Belgium.

**Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (ISPJAE).

Departamento de. Tecnología de Construcción de Maquinarias.

Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad Habana, Cuba.

Teléfono: 53 7-260 2267, Fax: 53 7-267 7129.

E-mail: goyos@mecanica.ispjae.edu.cu

(Recibido el 14 de diciembre del 2001, aceptado el 20 de febrero del 2002).

Resumen.

Se estudia la influencia del Na, Sr y Ti y sus combinaciones (Na-Ti y Sr-Na) en las propiedades mecánicas y el rechupe (superior y lateral) de la aleación hipoeutéctica AlSi7Mg. Aunque todos estos elementos y combinaciones tienden a neutralizar la formación del rechupe substancialmente, el Sr se presenta como el más eficaz para disminuir el rechupe superior mientras la combinación Na-Ti llevó a la menor formación de rechupe lateral.

Se observó una acción modificadora excelente para 0.02% de Sr y 0.02% de Na, pero a diferencia del Sr, el efecto modificador del Na comienza a desvanecerse después de 30 min afectando el alargamiento notablemente. El estroncio, sin embargo, mostró un efecto de la modificación muy duradero (aproximadamente 3 h). Otro hallazgo interesante es la existencia de un cierto periodo de incubación de aproximadamente 90 minutos después de agregar Sr. Contrariamente a lo esperado el uso de titanio no mejoró las propiedades mecánicas a pesar de un eficaz refinamiento de grano.

Palabras claves: Rechupe superior, acción modificadora, propiedades mecánicas, metalurgia no ferrosa.

1. Introducción.

Las aleaciones Al-Si se prefieren cuando se necesitan buenas propiedades de fundición y buena resistencia a la corrosión. Las aleaciones comerciales Al-Si abarcan los campos hipoeutéctico e hipereutéctico hasta aproximadamente 25% Si.

Si se desean alta resistencia y dureza, las adiciones de Mg hacen a estas aleaciones tratables térmicamente. En este caso, el endurecimiento se atribuye a la formación del compuesto de Mg₂Si con una solubilidad máxima de 1.85% a la temperatura eutéctica y menos de 0.2% a la temperatura ambiente.

La estructura eutéctica de las aleaciones Al-Si puede ser afectada considerablemente por la velocidad de enfriamiento y la cantidad de modificadores. Es conocido que la aleación Al-Si sin modificar contiene grandes agujas de silicio, con la consiguiente disminución en resistencia y ductilidad. Con la modificación el silicio asume una estructura fina y las

propiedades mecánicas aumentan substancialmente. Hoy día, el proceso de la modificación de las aleaciones hipoeutécticas Al-Si con elementos como Na, Sr y Sb se ha convertido en práctica normal de fundición.

La técnica del análisis térmico es comúnmente usada para controlar tanto el grado de modificación como el refinamiento de grano en la fundición de aluminio. La presencia de modificador normalmente puede relacionarse con la forma del escalón del eutéctico en la curva de enfriamiento. Sin embargo, la cuestión más importante es escoger un parámetro apropiado entre el tiempo y la temperatura para caracterizar el grado de la modificación eficazmente.

2. Técnica experimental.

Para la investigación presente, fusiones de Al7%SiMg con contenido variable de Mg fueron obtenidas a partir de la aleación primaria de Al7Si y el Mg en un horno de crisol de llama. Las cantidades deseadas de Ti y Sr se adicionaron por medio de prealeaciones como: AlTiB

3/1 y Al9.9Sr mientras el sodio se agregó en forma de latas selladas de aluminio con Na fundido al vacío.

El Mg en la fusión fue variado agregando 0.1% aproximadamente cada 12 minutos (salvo la aleación que contiene 0.02%Sr). Se tomaron dos muestras antes de cada adición y después de desescoriar cuidadosamente. La primera muestra se coló en un molde de muestra de análisis térmico para obtener la curva de enfriamiento. Los datos fueron registrados en una computadora mediante una interfaz comercial. La segunda muestra fue usada para caracterizar la composición química, propiedades mecánicas y grado de modificación. La temperatura de colada fue 720 °C.

La acción modificadora del Sr se estudió para tres niveles diferentes (0.2, 0.15 y 0.02%). Después de la adición inicial de Sr, se tomaron muestras cada 30 minutos durante dos horas y cada hora a partir de ese momento. El tratamiento térmico consistió principalmente en dos pasos. Primeramente las muestras se mantuvieron a 530 °C durante 6 h seguido de un enfriamiento en agua. El segundo paso consistió en mantenimiento a 160°C durante 8 h seguido de enfriamiento al aire.

Influencia del Mg.

Se conoce que las propiedades mecánicas de Al-Si con pequeñas adiciones de Mg mejoran significativamente por el tratamiento térmico. Aunque los contenidos comunes del magnesio se encuentran entre 0.35 y 0.6%, el mecanismo de endurecimiento por precipitación todavía es eficaz para mayores contenidos toda vez que el compuesto de Mg_2Si tiene una solubilidad máxima de 1.85% en aluminio a la temperatura eutéctica, como ya se señaló.

En la investigación presente el magnesio fue variado de 0.6-0.8% a fin de estudiar su influencia en la resistencia límite, en el límite de fluencia y en el alargamiento. La figura 1 y la Tabla I muestran el comportamiento de estas propiedades de acuerdo al contenido de Mg. Como puede verse la resistencia es incrementada notablemente con el aumento del contenido de Mg. Sin embargo, al aumentar estas propiedades, el alargamiento se disminuye en magnitud apreciable.

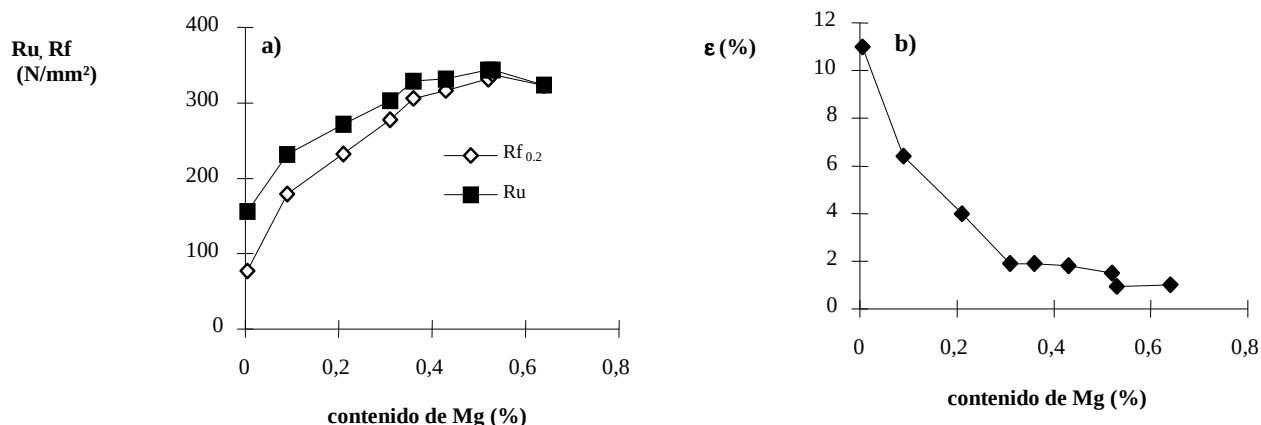


Figura 1 Influencia del contenido de Mg en las propiedades mecánicas (aleación A).

Por otro lado, se determinó en las aleaciones A356 y A357 que un aumento en el magnesio conlleva a los siguientes efectos [1]:

- La reducción de la temperatura eutéctica Al-Si.
- La formación de una eutéctica ternaria que solidifica a 555 °C.

En el estudio presente se observó que el aumento del magnesio provoca una marcada disminución de la temperatura del eutéctico. Según nuestros resultados (vea Fig.2) un aumento de Mg hasta 0.64% puede reducir la temperatura mencionada en 14 °C.

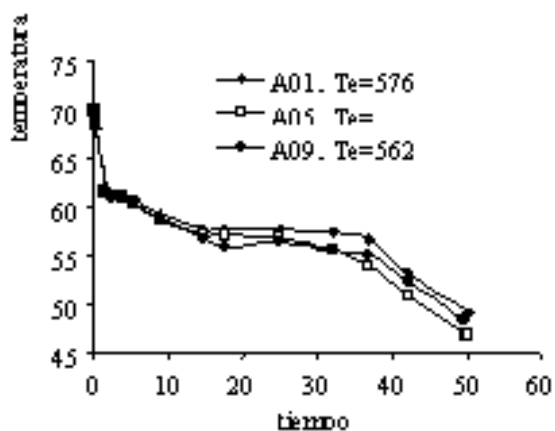


Figura 2. Curvas de enfriamiento

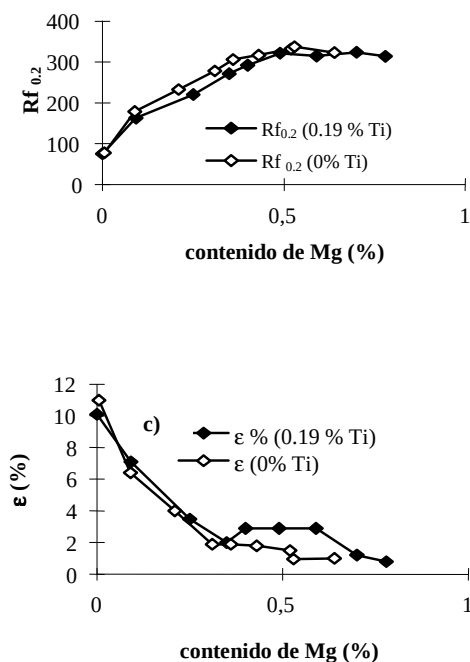


Figura 3. Acción del Ti en Rf0.2, Ru y ε (%) (aleaciones A y B).

El Titanio como refinador de grano.

El uso de Ti como refinador de grano es una práctica normal de la fundición. Se supone que un tamaño de grano fino mejora las propiedades mecánicas y de fundición (por ejemplo la fluidez y la resistencia a grietas en caliente). Sin embargo, el titanio no parece reforzar las propiedades mecánicas según nuestros resultados experimentales que se muestran en la Tabla I (aleación B) y la figura 3.

El volumen de Ti en nuestras aleaciones (0.19%) estaba dentro del rango recomendado de 0.1-0.2%. No obstante, este nivel alto de Ti puede dar lugar a partículas intermetálicas groseras que son perjudiciales a las propiedades mecánicas.

El Estroncio como agente modificador.

En primer término la acción modificadora del Sr en las aleaciones de AlSi está determinada por la velocidad a que el Sr de la prealeación se disuelve y se distribuye homogéneamente en la aleación. Sin embargo, también depende del tiempo de desvanecimiento después de agregar el Sr.

Se conoce que la adición del Sr elimina dos de los problemas que se presentan con la modificación con

sodio, a saber, la generación de humos y la recuperación pobre e incierta

Tabla I Composición química y propiedades mecánicas de las aleaciones.

Cod	% Mg	% Na	% Sr	% Ti	Rf _{0.2} (N/mm ²)	Ru (N/mm ²)	ε (%)
A (01)	0,005				77,5	155,5	11
(21)	0,09				179	231,5	6,4
(31)	0,21				232	271,5	4
(41)	0,31				277,5	303	1,9
(51)	0,36				306	328,5	1,9
(61)	0,43				316,5	332	1,8
(71)	0,52				331,5	343,5	1,5
(81)	0,53				337,5	343,5	0,95
(09)	0,64				322,5	323,5	1
B (01)	---			0,19	75,5	153,5	10,1
(21)	0,092				163	216,5	7,1
(31)	0,25				220	241,5	3,5
(41)	0,35				270,5	287	2
(51)	0,4				292	318	2,9
(61)	0,49				322	343	2,9
(71)	0,59				315	338	2,9
(81)	0,7				323,5	324	1,2
(09)	0,78			0,19	314	314	0,8
C(01)	0,007		0,2		73	155,5	18,8
(21)	0,095		0,18		168	220	6,7
(31)	0,2		0,16		217	256	4,1
(41)	0,29		0,14		265	298	3,97
(51)	0,38		0,09		288	311	2,2
(61)	0,45		0,075		300	321	1,9
(71)	0,57		0,069		313	324	1,6
(09)	0,74		0,066		317	321,5	1,36
D (01)	0,006	0,02			87	161,5	12,3
(02)	0,09	0,018			167	213,5	8,9
(03)	0,19	0,016			229	274	7,12
(04)	0,28	0,014			264	301	4,38
(05)	0,38	0,013			290	321,5	3,3
(06)	0,47	0,012			315	340	2,87
(07)	0,57	0,012			307,5	318	0,95
(08)	0,66	0,012			319,5	328	0,82
(09)	0,78	0,011			341,5	356	0,82
E (01)	0,001	0,015		0,18	73,5	159,5	18
(02)	0,095	0,013		---	156	215	9,6
(03)	0,2	0,0135		---	225	270,5	7,6
(04)	0,3	0,012		---	272,5	309,5	6,4
(05)	0,4	0,012		---	298	324,5	2,2
(06)	0,51	0,012		---	299,5	321,5	2,2
(07)	0,61	0,012		---	315,5	325	1,5
(08)	0,7	0,011		---	328,5	338	1,6
(09)	0,78	0,01		0,18	325	343,5	3
F (01)	0,013		0,15		65,5	148	22
(02)	0,108		0,13		167	180	7,3
(03)	0,22		0,11		220	223	4,7
(04)	0,325		0,09		242	265	3,5
(05)	0,42		0,073		260	281	2,2
(06)	0,56		0,065		277,5	296,5	1,9
(07)	0,68		0,051		291,5	305	1,65
(08)	0,76		0,048		299,5	312,5	1,8
(09)	0,88		0,045		304,5	321,5	1,65
G (01)	0,004	0,024	0,22		72,5	150,5	11,4
(02)	0,1	0,019	0,207		163	207	6
(03)	0,21	0,016	0,18		220	249	2,3
(04)	0,33	0,014	0,16		264,5	289,5	2,4
(05)	0,45	0,013	0,14		286	301	2
(06)	0,54	0,014	0,13		290	298,5	1,9
(07)	0,65	0,014	0,12		309	315,5	1,8
(08)	0,77	0,0125	0,11		328	328	1,2
(09)	0,87	0,0115	0,095		341	349,5	0,7
H (01)	0,55		0,02		284,5	321	6
(02)	0,55		0,019		288	325,5	8,4
(03)	0,51		0,017		283	326	8,6
(04)	0,51		0,015		237	273	8
(05)	0,5		0,012		258	296	6,4
(06)	0,49		0,01		262	300	4,6
(07)	0,46		0,01		266,5	312,5	5,4
(08)	0,44		0,009		261,5	307	7,1

En el estudio presente, las cantidades iniciales de Sr eran 0.2, 0.15 y 0.02%. En la Tabla I aparecen los resultados obtenidos para estas adiciones (aleaciones C, F y H). Está claro que los volúmenes de 0.2 y 0.15% de Sr provocaron un alargamiento muy alto (18.8 y 22%) pero esta propiedad empieza a disminuir notablemente después de aproximadamente 12 minutos como se muestra en la fig. 4.

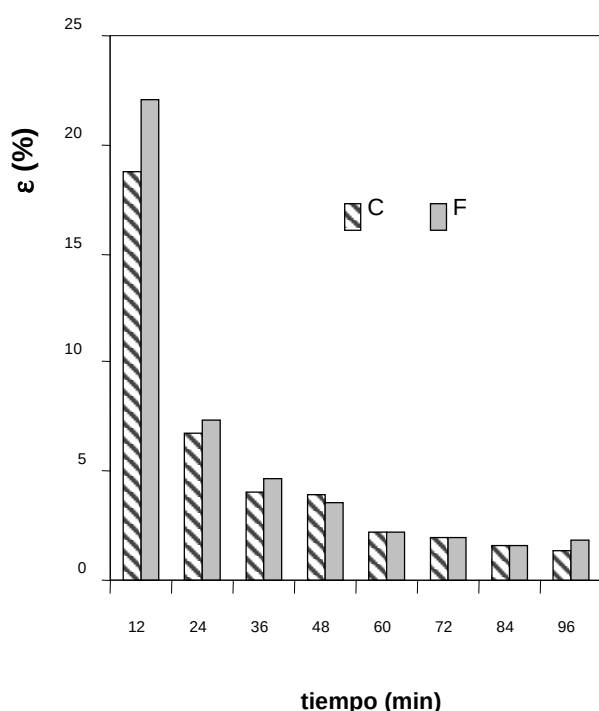


Figura 4 Elongación vs. tiempo de mantenimiento para las aleaciones con 0.2%Sr (C) y 0.15%Sr (F)

Otra observación interesante es que un cierto periodo de incubación parece reforzar la modificación ligeramente toda vez que el alargamiento mayor se obtuvo 90 minutos después de la adición inicial (muestra H03). Puede observarse en la figura 6 (0.02% Sr como contenido inicial) que a pesar de una pérdida incesante

Este hecho puede explicarse considerando que los volúmenes altos de Sr causan sobremodificación asociada con la formación del compuesto Al_2SrSi_2 que contribuye a una disminución en las propiedades mecánicas. Según se muestra en la figura 5, una cantidad inicial de 0.02% Sr mejora el alargamiento grandemente a la vez que tiende a mantener esta propiedad constante para tiempos de hasta 3 horas a pesar del desvanecimiento del Sr.

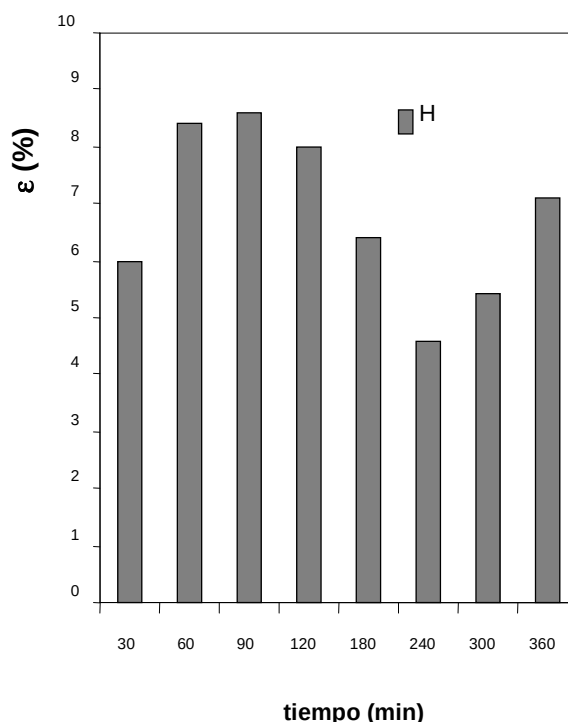


Figura 5 Elongación vs. Tiempo de mantenimiento para las aleaciones con 0.2 % Sr (H)

de Sr durante el mantenimiento, el grado de modificación permanece casi constante con tiempos de mantenimiento de hasta 3h (muestra 05).

Esto contrasta con el caso del Na donde la pérdida continua de este elemento se acompaña de una pérdida correspondiente en la modificación.

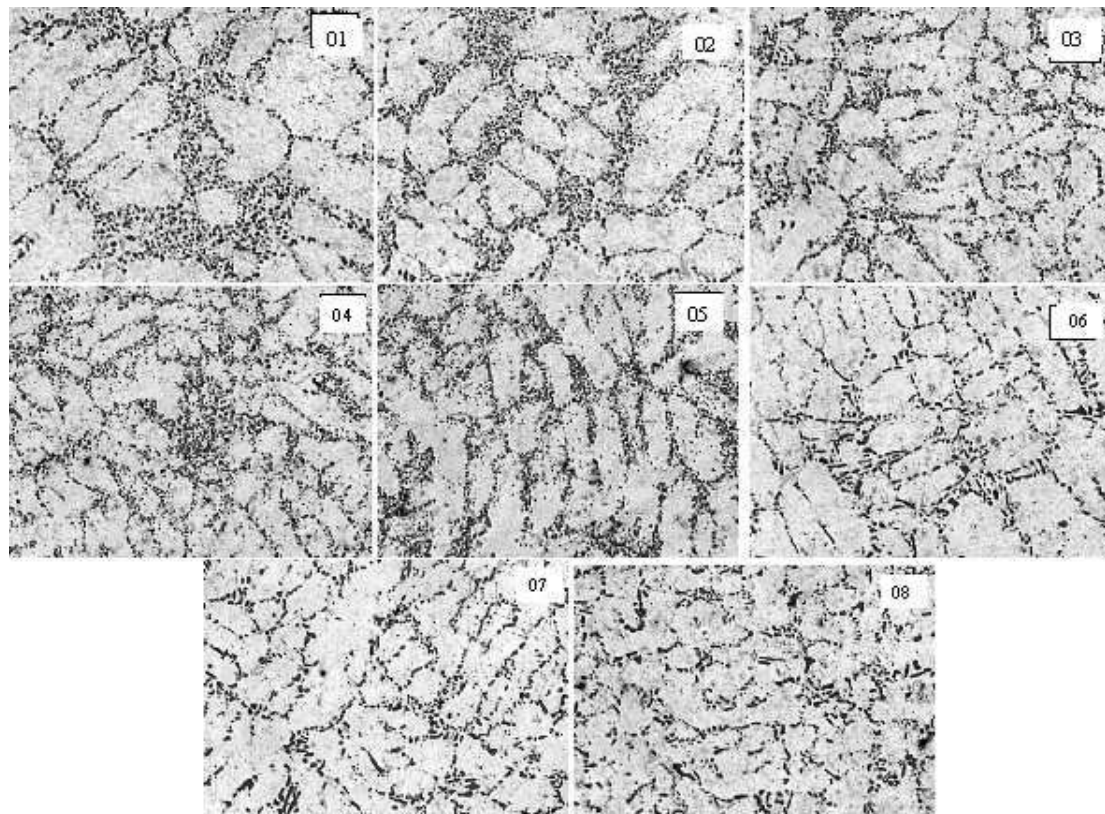


Figura 6 Estructura de las muestras tratadas con contenido inicial de 0.02 %Sr (aleación H)

El sodio como agente modificador

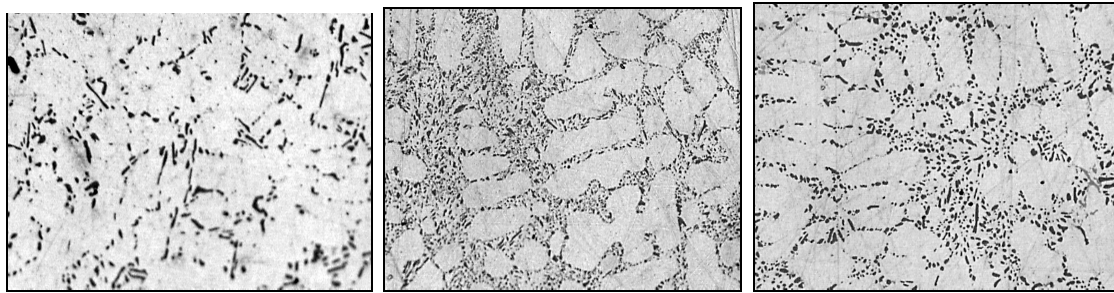
Se estudió el efecto del sodio en la modificación del eutéctico para una cantidad inicial de 0.02%. La figura 7 (b)-(c) muestra el grado de modificación para las muestras que contienen 0.02% y 0.012% de Na respectivamente. A juzgar por estas figuras el rápido desvanecimiento del Na (por ejemplo, de 0.02 a 0.012% en aproximadamente 1h) afecta el grado de modificación significativamente. El mismo hecho también se revela por las curvas de enfriamiento mostradas en la figura 8 donde la disminución de la temperatura eutéctica asociada con las pérdidas de Na refleja la disminución del grado de la modificación.

A diferencia del Sr, esta pérdida rápida del modificador provoca una disminución importante del

alargamiento como se muestra en la tabla I (aleación D). Por consiguiente, puede esperarse una acción modificadora poderosa del Na sólo en el rango de aproximadamente 30 min.

3. Influencia de adiciones simultáneas de Na-Ti o Sr-Na en las propiedades mecánicas.

Los datos de la Tabla I muestran que una adición simultánea de Sr-Na (aleación G) no es más eficaz que la adición de Sr solamente con respecto a las propiedades mecánicas. De forma semejante el uso de la combinación Ti-Na (aleación E) no resulta superior al uso del Na exclusivamente.



a) muestra sin modificación

b) 0.02 %Na

c) 0.012 %Na

Figs.7 Evolución de la modificación con Na.

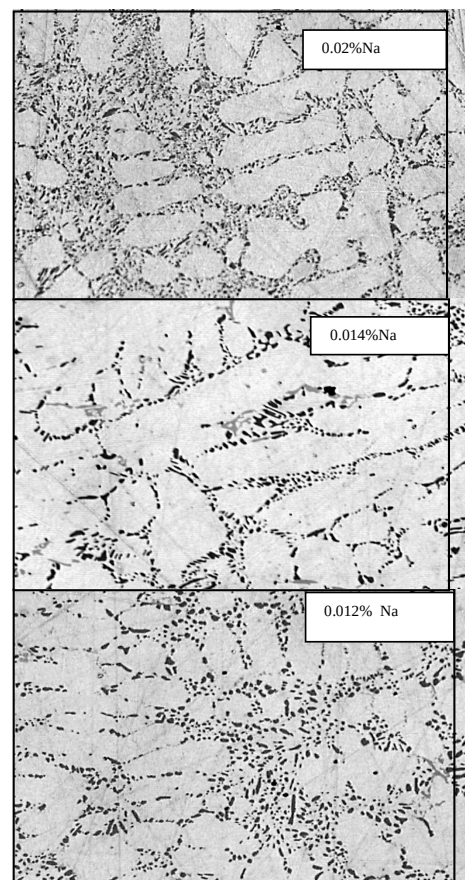
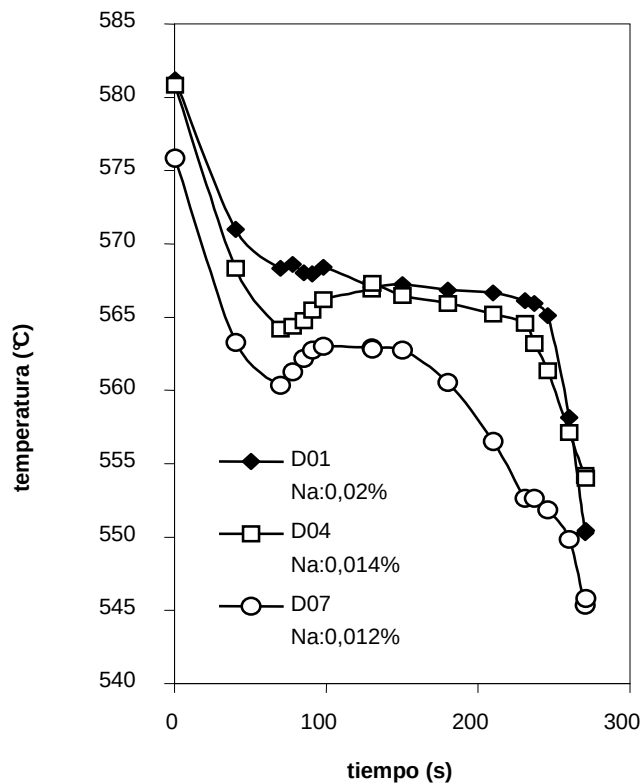


Figura 8 Curvas de enfriamiento y estructuras en función del contenido de Na.

A diferencia del Sr, esta pérdida rápida del modificador provoca una disminución importante del alargamiento como se muestra en la Tabla I (aleación D). Por consiguiente, puede esperarse una acción modificadora poderosa del Na sólo en el rango de aproximadamente 30 min.

Influencia de adiciones simultáneas de Na-Ti o Sr-Na en las propiedades mecánicas.

Los datos de la tabla 1 muestran que una adición simultánea de Sr-Na (aleación G) no es más eficaz que la adición de Sr solamente con respecto a las propiedades mecánicas. De forma semejante el uso de la combinación Ti-Na (aleación E) no resulta superior al uso del Na exclusivamente.

Influencia del Ti, Na y Sr en el rechupe .

Las aleaciones modificadas con sodio se caracterizan por presentar porosidad dispersa por rechupe. El rechupe concentrado reducido es uno de los rasgos observado al usar Ti o Sr en lugar de Na. Así, por el contrario, la reducción del rechupe poroso podría relacionarse a un aumento del rechupe concentrado.

En este estudio, se ha cuantificado el rechupe concentrado para las diferentes aleaciones con el fin de

dilucidar del Ti, Na y Sr en este comportamiento. Fue necesario no sólo considerar el rechupe superior si no también el lateral (Figuras 9 y 10). El rechupe superior fue calculado llenando la cavidad con WC en polvo para calcular el volumen ocupado mientras el rechupe lateral fue evaluado por la diferencia entre las magnitudes L1 y L2 (Fig. 10).

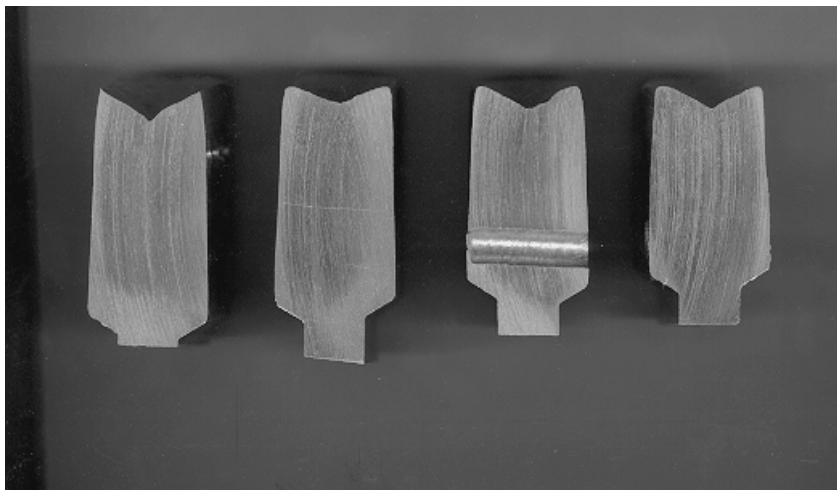


Figura 9 Rechupe superior presentado por algunas aleaciones representativas

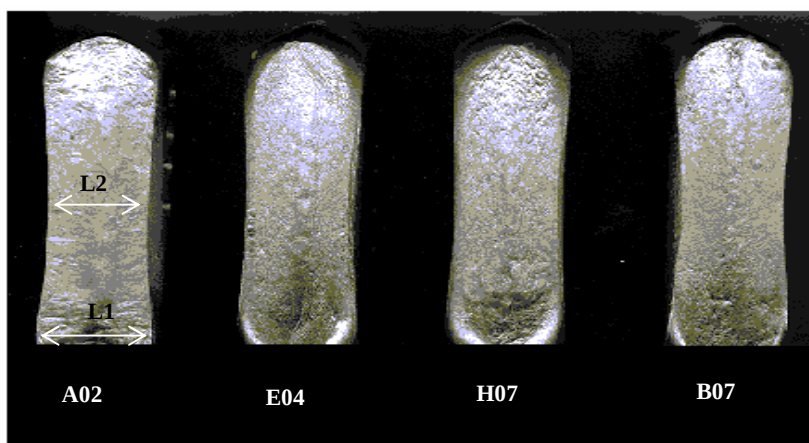


Figura 10 Rechupe lateral de algunas aleaciones representativas

Los resultados finales se muestran en las Tablas II y III. Según estos resultados todos estos elementos disminuyen la magnitud del rechupe superior, sin embargo, el Sr resultó el más eficaz para neutralizar el mismo. Además, el resultado mejor se logra para un Sr del 0.02%. Por otro lado, la adición simultánea de Ti y Na

(seguido por Sr) aparece como el procedimiento más eficaz para reducir el rechupe lateral.

La misma conclusión puede hacerse de las figuras 9 y 10 que muestran el rechupe medio para las aleaciones más representativas

Tabla II. Rechupe superior promedio.(%).

muestra	130397	200397	30497	100497	140497	160497	230497	100698
01	0,75	0,47	0,58	0,60	0,55	0,61	0,67	0,37
02	1,00	0,62	0,89	0,66	1,13	0,52	0,92	---
03	---	0,71	0,59	0,63	0,49	0,53	0,67	0,35
04	1,13	0,87	0,63	0,56	0,51	0,91	0,78	0,36
05	0,79	0,77	---	---	0,39	1,02	0,64	0,52
06	0,87	0,98	0,61	0,75	0,76	0,49	0,78	0,94
07	1,02	0,68	0,78	0,60	1,24	0,65	0,84	0,27
08	1,16	0,68	0,55	0,75	0,81	0,81	1,16	0,44
09	---	---	0,58	0,80	0,81	0,53	0,67	---
Promedio	0,96	0,72	0,65	0,67	0,74	0,67	0,79	0,47

Tabla III. Rechupe lateral promedio (%)

muestra	130397	200397	30497	100497	140497	160497	230497	100698
01	13,45	13,70	14,74	14,02	12,39	13,48	14,24	9,96
02	15,42	12,49	15,09	10,49	13,01	11,99	17,91	---
03	---	12,43	12,54	12,58	10,13	11,45	10,30	10,10
04	19,4	12,59	10,77	10,02	9,67	14,27	13,16	9,20
05	15,37	11,50	---	---	7,78	15,35	11,35	12,09
06	12,79	10,00	13,08	13,29	8,37	11,16	12,83	14,81
07	16,35	11,50	14,03	11,89	8,24	12,48	11,30	11,35
08	15,53	7,81	13,08	9,96	9,27	17,87	20,98	10,39
09	---	---	12,48	11,79	8,80	11,16	11,11	---
Promedio	15,47	11,50	13,23	11,75	9,74	13,25	13,69	11,13

4. Conclusiones.

A partir de los resultados obtenidos puede arribarse a las siguientes conclusiones:

- El titanio como refinador de grano no mejora las propiedades mecánicas.
- El estroncio y el sodio son ambos agentes modificadores eficaces para las aleaciones hipoeutécticas. Sin embargo, el estroncio mantiene su acción modificadora por mayor tiempo que el sodio.
- El desvanecimiento rápido del Na provoca una marcada disminución del alargamiento.
- No se recomiendan cantidades de estroncio iniciales de 0.2 y 0.15%. Estos altos contenidos de Sr causarán sobremodificación con un efecto negativo en la resistencia.
- Un contenido inicial de 0.02% de Sr provoca una mejora significativa en el alargamiento que permanece alto y casi constante por 3 h a pesar de una pérdida constante de Sr.
- El efecto modificador del estroncio (para 0.02%) parece mejorar ligeramente con el aumento del tiempo de mantenimiento al obtenerse la mejor elongación 90 min. después de la adición inicial.

- El uso simultáneo de Na-Ti o Sr-Na no conduce a una mejora sustancial de las propiedades mecánicas.
- El tratamiento con Ti, Na y Sr disminuye el macrorechupe notablemente. El estroncio es el más eficaz para neutralizar el rechupe superior. Por otro lado, la adición de la combinación Na-Ti (seguida de Sr) provoca un rechupe lateral más pequeño.

5. Bibliografía y Referencias.

- [1] Charbonnier J. "Foundry Monitoring of Aluminium Alloys using Thermal Analysis". Proceedings of the Conference on Thermal Analysis of Molten Aluminium. Dec. 11-12, 1984.
- [2] Aluminum and Aluminum Alloys. ASM Specialty Handbook. March 1996.
- [3] Medina F. Report of Posdoctorate. Jan. 1999

Modifier and refiners effect evaluation in the magnitude and mechanical shrinkage behavior of Al-Si-Mg alloys.

Abstract

The influence of Na, Sr and Ti and their combinations (Na-Ti and Sr-Na) on the mechanical properties and the shrinkage (top macro shrinkage and lateral macro shrinkage) of hypoeutectic aluminium-silicon alloys (AlSi7xMg) has been studied. Although all these elements and combinations tend to counteract substantially the shrinkage formation, Sr appeared to be the most effective to decrease top macro shrinkage whereas the combination Na-Ti led to the least formation of lateral macro shrinkage. An excellent modifying action was observed for 0.02% Sr and 0.02% Na, but unlike Sr the modifying effect provided by Na started fading after 30 min of holding which affected the elongation markedly. However, strontium showed a very lasting modification effect (about 3 h). Another interesting finding is the existence of a certain incubation period of about 90 minutes after adding Sr. Contrary to expected the use of titanium did not lead to any improvement of the mechanical properties despite an effective grain refinement.

Key words: modifier action, mechanical properties.