

Influencia del contenido de Mg,Cu y Ni en la estructura y propiedades mecánicas de las aleaciones Al-7Si fundidas.

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

*Lab. Non Ferrous Metallurgy, Department of Metals and Materials Science, Ghent University, Technologiepark 914, B-9052 Zwijnaarde.

** Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinarias.

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

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

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

E-mail: goyos@mecanica.cujae.ed.cu

(Recibido el 12 de Diciembre del 2002, aceptado el 17 de Marzo del 2003).

Resumen.

El diseño de aleaciones de aluminio de alta calidad involucra la selección adecuada de los elementos de aleación y la correcta aplicación del tratamiento térmico, con la desventaja del necesario aumento del tiempo del proceso. En el presente trabajo se analiza la influencia de la adición de diferentes elementos de aleación sobre la estructura y propiedades mecánicas de la aleación base Al7SiMg (A356). Las propiedades fueron analizadas para la aleación en estado fundido, después de la modificación y con tratamiento térmico con el fin de evaluar la posibilidad de eliminar el tratamiento posterior mediante una correcta selección de los elementos de adición.

Palabras claves: Aleaciones de aluminio, elementos de aleación, diseño de aleación, fundición, propiedades mecánicas, tratamiento térmico.

1. Introducción.

Habitualmente en las aleaciones Al-Si los contenidos de silicio se mueven en el rango de 5 a 25 % . La estructura de estas aleaciones fundidas consiste comúnmente en una eutéctica de Al-Si, solución sólida rica en aluminio o silicio y otros compuestos. Esta estructura determina las propiedades mecánicas de la aleación y está condicionada fuertemente por la forma de solidificación [1], las adiciones de elementos de aleación y el posterior tratamiento térmico.

Dependiendo de la pureza de la carga del horno, las aleaciones Al-Si contienen un nivel variable de impurezas (Fe, Mn, Zn, etc). Otros elementos, por ejemplo cobre y magnesio, frecuentemente se agregan para incrementar la dureza y resistencia de la aleación en las piezas fundidas. Todas estas impurezas y elementos de aleación pueden permanecer parcialmente en la solución sólida en la matriz o formar compuestos intermetálicos durante la solidificación.

Algunos otros elementos de baja solubilidad, entre ellos Fe, Ni, Ti, Mn y Cr forman compuestos secundarios entre ellos o con el silicio. Como es

conocido estos compuestos tienden a inducir un aumento en la resistencia y dureza de la aleación.

Las aleaciones binarias Al-Ni no están en uso actualmente, sin embargo el níquel puede estar presente en aleaciones como las Al-Cu y Al-Si con el objetivo de mejorar dureza y resistencia a temperaturas elevadas y para reducir el coeficiente de la expansión. Hoy día la formación de compuestos Ni-Al ($NiAl_3$ y NiAl) está investigándose para su aplicación como material estructural para uso a altas temperaturas.

La aleación de aluminio más común para resistencia al desgaste presenta hasta 4.5 % de Cu. La adición de cobre imparte una resistencia adicional fortaleciendo la matriz a través del endurecimiento por precipitación de la fase $AlCu_2$ o mediante la modificación de la fase Al-Si-Fe, dura y frágil. Es bien conocida la disminución de la solubilidad del Mg en el Aluminio con la disminución de la temperatura. En el caso de las aleaciones Al-Si hipoeutécticas, con contenidos de Si por encima del 0,2%, el Mg forma precipitados de Mg_2Si a temperaturas de 540 °C . En la última etapa de la solidificación, con pequeñas cantidades de líquido remanente y temperaturas alrededor de los 500 °C, es

posible la aparición de fases complejas de bajo punto de fusión en las cuales se combinan el Si, el Mg y el Fe. Las fases Al-Si-Fe no se afectan por la adición de Mg. Sin embargo, el Mg puede combinarse con fases insolubles de Al-Fe aparejando una pérdida del efecto endurecedor.

La aleación A356, como la más representativa del grupo Al-Si-Mg, presenta un contenido efectivo de Mg_2Si de entre 0,5 y 0,6 %. Esta combinación ofrece las mejores propiedades en lo que respecta a fundición en arena y coquillas. Por otro lado, desarrolla altas propiedades después del tratamiento térmico y presenta buena resistencia a la corrosión. Se reporta en la literatura [2] la presencia en el diagrama ternario Al-Si-Mg, en la zona rica en aluminio, de las fases:

- α (Al), β (Mg_2Al_3)
- ϵ ($Mg_{23}Al_{30}$)
- ξ ($Mg_{48}Al_{52}$)
- γ ($Mg_{17}Al_{12}$)
- Mg_2Si la más común

No obstante la interacción entre más de tres de los elementos aleantes presentes no ha sido estudiada con profundidad debido a la complejidad relativa a la predicción de las fases presentes a partir de los diagramas o los cálculos termodinámicos.

La adición de pequeñas cantidades de estroncio a la aleación transforma la estructura laminar del Si en una estructura fibrosa provocando el aumento del límite de resistencia, la ductilidad, la dureza y la maquinabilidad. Una modificación efectiva puede ser alcanzada con adiciones muy pequeñas (0,008 % - 0,04 %), pero usualmente se recomienda el uso de 0,02 %.

Por otro lado, las propiedades mecánicas de la aleación A356 dependen principalmente de varios factores como el tratamiento del metal (modificación o refinamiento del grano), velocidad de enfriamiento en el molde, elementos de aleación y el tratamiento térmico. Según la tabla 1 el tratamiento térmico (T6) induce propiedades mecánicas superiores a las alcanzadas modificando con Sr o Na.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la aleación A356 en función del tipo de tratamiento.

	De colada	Modificado con Na	Modificado o con Sr	Tratamiento térmico (T6)
R_u [MPa]	180	195	196	290-310
R_f [MPa]	87	100	90	200-250
ϵ [%]	6.5	16.4	14	12-16
HB	50	60	55	90-110

R_u : Límite de resistencia a la fractura.

ϵ : Elongación relativa.

R_f : Límite de fluencia.

HB: Dureza Brinell.

Una aproximación a los valores de las propiedades mecánicas logradas mediante el tratamiento térmico puede ser lograda a través del uso de las adiciones evitando así los prolongados períodos de tiempo necesarios para el tratamiento y la consiguiente reducción del tiempo y el costo de producción para piezas industriales. El objetivo de la presente investigación fue precisamente estudiar el efecto de los elementos de aleación (Cu, Mg, Ni) en la microestructura, dureza y propiedades mecánicas de la aleación A356 y determinar consecuentemente si la mejora de propiedades debida a la aleación hace posible la eliminación del tratamiento térmico. En el presente estudio fueron llevadas a cabo las siguientes etapas:

1. La preparación de la aleación A356 de colada, con tratamiento térmico, modificada y modificada con tratamiento térmico posterior.
2. La preparación de las aleaciones que contienen Cu, Mg y Ni, designadas como Al7Si-xCu-yNi-zMg de colada y modificadas con estroncio.
3. Análisis metalográfico de las muestras mediante microscopía electrónica de barrido y microsonda.
4. Evaluación de propiedades mecánicas: dureza HB, R_f , R_u y alargamiento.

2. Desarrollo Experimental.

Para este estudio, niveles diferentes de Mg, Ni y Cu (determinados a partir del análisis de la literatura [4]) fueron adicionados a diferentes composiciones base partiendo de mantener el Si en el 7 %. Los niveles definidos fueron: Cu 0.5, 1 y 1.5 % ; Mg 1, 1.5 y 2 % y para Ni 0.5 y 1 %. Las aleaciones se prepararon a partir de A356, AlNi20, AlCu95, AlSr10 y magnesio puro. Es importante señalar que cada aleación fue evaluada con y sin modificación. Se seleccionó un nivel de 0,02 % de estroncio para lograr el nivel de modificación deseable en las coladas procesadas. Otros materiales como el Degaser 200 y hexacloretano fueron usados para alcanzar una desgasificación y protección adecuadas del baño.

Fusión y Colada.

Se prepararon cargas de 8 kg en un horno de crisol a gas y se colaron a 720°C. La adición de los elementos de aleación se realizó luego del derretido, desoxidación y desgasificación. Las adiciones de Mg puro y AlSr10 se efectuaron por inmersión en campana después de un desescoriado cuidadoso. Las muestras requeridas para los ensayos de resistencia y dureza se prepararon a partir de cilindros de ϕ 25 mm obtenidos en coquillas normadas de acero precalentadas a 300°C.

Análisis químico y estructural.

La composición química de los materiales de carga y aleaciones experimentales se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica, salvo el caso de AlCu95 dónde se aplicó vía húmeda. Se pulieron muestras cilíndricas de las aleaciones estudiadas y se analizaron mediante microscopía óptica bajo magnificaciones de 20X a 100X para evaluar el grado de la modificación (GM), las características de la red dendrítica, porosidad y las fases presentes.

Mediante SEM-EDX se estudió la morfología de las fases y la composición puntual de las mismas. Los

análisis fueron repetidos al menos en número de tres para cada caso.

Evaluación de propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas (R_f , R_u y alargamiento) se determinaron a velocidad constante (5mm/min) usando una máquina de tracción Instron modelo 1195. La dureza se evaluó por medio de cargas de 62.5 kg durante 15 segundos con penetrador de diámetro 2.5 mm. en todos los casos

Análisis de los resultados experimentales.

Los resultados de composición química, análisis metalográfico y propiedades mecánicas se pueden observar en las Tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2. Composición química de las aleaciones.

Código	Composición química (en %)					
	Si	Mg	Cu	Ni	Sr	Al
A356	7.1	0.33	—	—	< 0.005	Resto
A356M	7.1	0.32	—	—	0.023	Resto
AXX	7.0	1.2	—	—	< 0.005	Resto
AMXX	7.0	1.1	—	—	0.02	Resto
FXX	7.05	1.25	0.5	0.5	>0.005	Resto
FMXX	7.0	1.22	0.5	0.50	0.019	Resto
EXX	7.0	1.22	1.1	0.50	<0.005	Resto
EMXX	7.0	1.18	1.1	0.51	0.018	Resto
CXX	7.15	0.95	1.51	0.55	<0.005	Resto
CMXX	7.1	0.90	1.50	0.54	0.019	Resto
DXX	7.1	2.3	1.65	0.55	<0.005	Resto
DMXX	7.1	2.2	1.65	0.55	0.021	Resto

M: con la adición de Sr.

Tabla 3 Características estructurales de las aleaciones.

Aleación	Distancia Interdendrítica [μM]	Grado de modificación	Porosidad [%]	Fases identificadas
A356 A356HT	29	1	1.5 2.0	α (Al), Si eutéctico
A356M A356MHT	24	4	2.5 2.5	α (Al), Si eutéctico
AXX AMXX	24.5 18.0	2 3-4	2.9 2.5	α (Al), Si eutéctico y Mg ₂ Si
FXX FMXX	16.5 15.8	1-2 3-4	3.0 2.5	α (Al), Si eutéctico, AlCu, AlCuNi, AlSiMg,
EXX EMXX	25 27.5	2-3 3	2.5 2.0	α (Al), Si eutéctico, AlCu, AlCuNi, (α (Al), Si eutéctico, AlCuNi,
CXX CMXX	34.5 19.0	1-2 3-4	3.0 2.5	α (Al), MgSi, AlNiMg, CuAl, α (Al), Si eutéctico, AlSiNi, CuAl,
DXX DMXX	22.5 23.0	1 1-3	2.5 2.0	α (Al), MgSi, CuAl, AlCuNi, α (Al), Cu ₂ Al, Si eutéctico, Al _x Si _y Mg _z ,Al _x Cu _y Ni _z , Al _x Si _y Cu _z Mg _w ,

GM: grado de la modificación: (1) no modificado, (2) pobre, (3) suficiente, (4) bueno, (5) muy bueno, (6) sobremodificado (sugerido la AFS)

Como se esperaba, la aleación A356 exhibió una mejora sustancial de propiedades mecánicas al modificar con 0.02% Sr (vea la Tabla 4). Sin embargo, los mejores resultados se manifiestan con la aplicación del tratamiento térmico (T6), que obviamente da lugar a la desventaja del aumento del tiempo de procesamiento. Por lo menos se necesitan 15 horas para lograr esta clase de tratamiento exitosamente.

Tabla IV. Propiedades mecánicas de las aleaciones.

Aleación	Propiedades mecánicas.			
	HB	R _u [Mpa]	R _f [MPa]	ε [%]
A356	54	160	80	3
A356HT	75	307	272	5
A356M	67	180	130	5
A356MHT	77	299	256	8.5
AXX	57	177.5	133	2.8
AMXX	62	193	141	3.2
FXX	60	221	174	1.8
FMXX	61	211	173	2.1
EXX	63	229	190	1.7
EMXX	65	223	195	1.4
CXX	95	184	171	1.4
CMXX	68	203	174	1.2
DXX	77	225	218	0.6
DMXX	74	233	217	1.4

HT (tratado térmicamente): Mantenimiento 530°C por 6h y enfriamiento en agua a 20°C.

Envejecimiento a 180°C durante 8h y enfriamiento al aire.

Entre todas las aleaciones experimentales, está claro que los mejores valores de R_f y R_u (190 MPa y 229 MPa) corresponden a la aleación EXX (Al-7Si-1Cu-0.5Ni-1.2Mg) cuya estructura se muestra en la figura 1. Las aleaciones experimentales mostraron tendencia a una disminución del alargamiento debido a la presencia de fases muy complejas que son duras y frágiles. Otro resultado que merece atención es la alta dureza de la aleación CXX (Al-7Si-1.5Cu-0.5Ni-1Mg) que es aún superior a la A356 después del tratamiento térmico.

Esta mejora notable de dureza puede relacionarse a las fases MgSi, CuAl y AlNiMg cuya presencia puede verse en la figura 2. Al comparar las propiedades mecánicas de la aleación A356 tratada, con aquellas de las aleaciones experimentales, se observa claramente que estas últimas no logran el mismo nivel de propiedades mecánicas. Hay algunas aleaciones sin embargo, como EXX (Al-7Si-1Cu-0.5Ni-1.2Mg sin Sr) cuyas propiedades mecánicas todavía son aceptables, destacándose que la diferencia es más notable al observar el esfuerzo límite por resistencia (R_u) y el alargamiento relativo (ε). No obstante, podrían mejorarse sustancialmente estas propiedades mecánicas de las aleaciones experimentales con un tratamiento térmico corto en lugar del T6 tradicional. Realmente, los

valores de separación entre los brazos de las dendritas mostrados en la tabla 3 reflejan esta posibilidad.

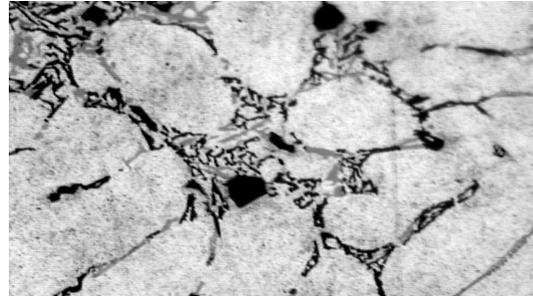


Figura. 1. Aleación EXX (100X), granos poliédricos, presencia de Si eutéctico (oscura delgada), AlCuNi (fase oscura) y AlCu (gris delgada)..

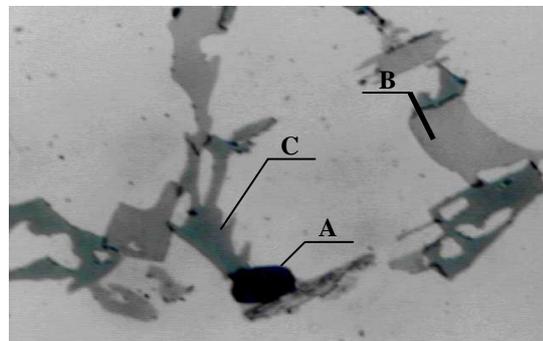


Figura. 2. Aleación CXX (100X). Presencia de MgSi (A), CuAl (B), AlNiMg (C).

Es obvio que las aleaciones con estructura dendrítica más fina responden mucho mejor al tratamiento térmico y esto provoca el logro de propiedades mecánicas superiores. Como se observa en la tabla III el valor de la distancia interdendrítica alcanzado en las aleaciones experimentales resultó menor que la correspondiente a la A356 con la excepción de la aleación CXX.

Es conocido que las aleaciones base Al con Si mayor del 7 % son de naturaleza frágil a causa de la forma acicular del eutéctico. La adición del estroncio dentro de 0.01-0.03% modifican el Si produciendo una textura fibrosa que refuerza las propiedades mecánicas. Esta característica se evidencia al comparar los resultados obtenidos con la A356 y la propia aleación modificada con Sr, aunque ambas aleaciones muestran similares resultados al aplicar el tratamiento térmico. Este efecto positivo del Sr es, en principio, difícil de predecir en las aleaciones de aluminio complejas.

La formación de fases binarias, ternarias o complejas puede tener lugar si los elementos de aleación están presentes en cantidades superiores al 0.5%, éste precisamente es el caso para las adiciones de Cu, Ni y Mg en el presente trabajo. Aún más, la aleación puede

ser más o menos resistente en dependencia de la morfología, cantidad y distribución de las fases secundarias formadas (Mg_2Si , $CuAl_2$, $NiAl$, $AlCuNi$, $AlNiMg$, $AlSiNi$, etc).

Una significativa globalización del eutéctico se observa claramente después de agregar Sr en la aleación (por ejemplo A356, AMXX, EMXX, CMXX y DMXX)

No obstante, esto no parece reforzar las propiedades mecánicas sino disminuirlas en algunos casos. La influencia negativa del Sr con respecto a las propiedades mecánicas fue observada al comparar las aleaciones EXX con EMXX y FXX con FMXX respectivamente.

Algunas aleaciones muestran una especie de regresión morfológica, fases muy finas que contienen Cu, Ni y Mg se transforman en fases masivas al agregar Sr. Este efecto se encontró en las aleaciones como FMXX y DMXX donde el Sr afectó tanto el silicio como las fases complejas.

3. Conclusiones.

- Es posible la obtención de aleaciones Al-7Si-xCu-yMg-zNi dentro del intervalo de la composición química propuesta en este estudio toda vez que no se presentan insolubilidad u otros problemas técnicos. La adición de Sr a estas aleaciones no siempre es conveniente dado que puede conducir a regresiones morfológicas que afectan las propiedades de la aleación grandemente.
- Para los rangos estudiados de composición química, se detectó la presencia de fases tradicionales para las aleaciones base Al-Si ($CuAl_2$, Mg_2Si , $NiAl$) así como fases complejas precipitadas. La distribución y morfología son particulares para cada aleación.
- Es posible el aumento en las propiedades mecánicas (excepto el alargamiento) para algunas aleaciones experimentales de fundición, en comparación con la aleación A356. Esto es muy ventajoso dado que esta mejora sustancial se logra

sin tratamiento térmico y por ende con un ahorro de tiempo sustancial en la producción. Aunque no fue posible alcanzar las propiedades mecánicas de la aleación A356 tratada se obtuvo un valor de resistencia sólo 25,4 % inferior. También es notable el aumento de dureza logrado en la aleación CXX alcanzando valores comparables con un hierro gris de bajas propiedades lo que permite su aplicación en partes que requieran dureza.

4. Bibliografía.

1. Hogerl J, Spaic S, Tensi H, "Optical Microscopy and Submicroscopy Structure Morphology of the Alloy 357 super, Aluminium 74" Jahrgang, (1998).
2. Elsen W, Wiggen Van PC, Chai G, Backerud L, "On the Sr Modification on Al-Si Alloys", 3rd International Conference of Al Alloys, Norwegian Inst. of Techn., June (1992), p.75.
3. Backerud L, Chai G, Tamminen, "Solidification Characteristics of Al Alloys, V.2 Foundry Alloys", AFS/ SKANALUMINIUM (1990).
4. Gruzleski J, Closset B, "The treatment of liquid Al-Si Alloys", AFS (1990).
5. Roy N, Samuels AM, Samuels SH, "Porosity formation in Al-9Si-3Cu Alloy System: Metallographic Observations", Metallurgical and Materials Trans. A, V. 27A, February (1996).
6. Davis J, "Aluminium and Aluminium Alloys", ASM Speciality Handbook, 3rd Edition, (1994).
7. Hatch J, "Aluminium Properties and Physical Metallurgy", ASM, 4ht, (1990), p.224.
8. Petzow G and Effenberg G, "Ternary Alloys", V.7, V.8, ASM International (1993).
9. Tensi H, Rosch R, Xu C, "Solidification and Heat Treatment of AlSi7Mg0.3 and Al7SiMg0.3Sr", 3rd International Conference of Al Alloys, Norwegian Inst. of Techn., June (1992), p.87.

Mg,Cu and Nickel content influence in the structure and mechanical properties of Al-7Si casting alloys.

Abstract.

The design of high quality aluminum alloys involves the appropriate selection of the alloy elements and the correct application of the thermal treatment, with the disadvantage of the necessary increase of time process. Presently work analyzed the influence of the addition of different alloy elements on the structure and mechanical properties of the alloy Al7SiMg bases (A356). The properties were analyzed for the alloy in fused state after modification and with thermal treatment with the purpose of evaluating the possibility to eliminate the later treatment by means of a correct selection of the addition elements.

Key words. Aluminum alloys, alloy design, mechanical properties, casting, thermal treatment.