

Д. В. Иванченко

Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского»,
Киев

МИКРОСТРУКТУРА АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВОГО СПЛАВА АК5М, УПРОЧНЕННОГО ЦИРКОНИЕМ, ВВЕДЕННЫМ ИЗ ФТОРИДА

Исследована микроструктура алюминиево-кремниевого литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, который был введен из фторида циркония. Установлено, что цирконий в сплаве находится в виде отдельных зерен Al_3Zr .

Ключевые слова: алюминийевые сплавы, модификатор, микроструктура, фторид циркония.

Досліджено мікроструктуру алюмінієво-кремнієвого ливарного сплаву АК5М, зміцненого цирконієм, введеним із фториду цирконію. Встановлено, що цирконій у сплаві знаходиться у вигляді окремих зерен Al_3Zr .

Ключові слова: алюмінієві сплави, модифікатор, мікроструктура, фторид цирконію.

The microstructure of aluminum-silicon alloy AK5M reinforced by zirconium which was entered into alloy from zirconium fluoride was investigated. It is established that the zirconium in the alloy is in the form of individual Al_3Zr grains.

Keywords: aluminum alloys, inoculant, microstructure, zirconium fluoride.

Введение

Для измельчения зерен α -фазы (раствор кремния в алюминии) и β -фазы (кремния) доэвтектических и эвтектических силуминов среди других элементов используют и цирконий. При взаимодействии циркония с Al-Si расплавом образуется соединение Al_3Zr , но интерметаллид циркония с алюминием по параметрам кристаллической решетки не отвечает принципу размерного и структурного соответствия Данкова-Конобеевского по отношению к аналогичным параметрам α -фазы и β -фазы [1]. Поэтому цирконий не может выступать в качестве модификатора зародышеобразующего действия при кристаллизации доэвтектических и эвтектических силуминов. Модифицирующее действие циркония частично объясняется образованием вместе с кремнием тугоплавкого соединения, которое может блокировать рост зародышей β -фазы, что в соответствии с классической теорией модификации приводит к измельчению кремния. Однако остается неизвестным, почему цирконий измельчает только эвтектический кремний, а на первичный производит слабое действие.

Исследованиями [2] было установлено, что при обработке расплава АК9 электрическим током содержание водорода в жидком силумине уменьшается с 1,5 до 0,2 см³/100 г, что приводит к модифицированию структуры сплава, поэтому необходимо отметить, что дегазация водорода в силумине имеет также существенное влияние на процесс кристаллизации. Кроме того, известно, что цирконий при повышенных температурах является одним из самых сильных гидридообразующих элементов. В расплаве цирконий и интерметаллид циркония, а также силицид циркония будут активными поглотителями или адсорбентами водорода. Цирконий и все эти соединения связывают растворенный водород, уменьшая его концентрацию

Кристаллизация и структурообразование сплавов

в расплаве силумина. В результате, при его кристаллизации увеличивается число центров кристаллизации α -фазы, что также приводит к измельчению структуры сплава [2].

На основании вышеуказанного были проведены исследования по определению содержания водорода в алюминиевых сплавах системы Al-Mg-Si, а именно АМг11 и АМг5К, модифицированных смесью, которая содержит фторид циркония (рис. 1).

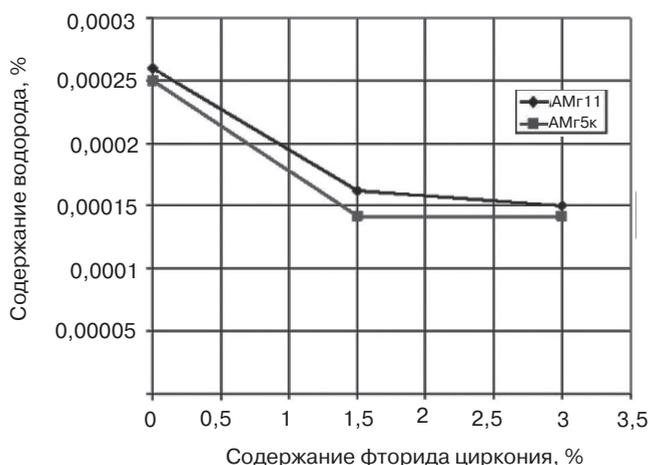


Рис. 1. Содержание водорода в алюминиево-магниевых сплавах АМг11 и АМг5к, модифицированных смесью, содержащей до 3 % ZrF_4 и до 6 % Na_3AlF_6

Из диаграммы, представленной на рис. 1, видно, что с увеличением содержания фторида циркония, который вводится в расплав, содержание водорода, растворенного в указанных сплавах, уменьшается, что косвенно подтверждает предложенный механизм модифицирования силуминов.

Кроме того, исследования сплавов системы Al-Zr-Si [3] показали, что предел образования интерметаллида Al_3Zr при начальном необходимом количестве циркония в алюминиевом сплаве 0,75 при введении 2 % кремния снижается до 0,5 % циркония в расплаве (рис. 2), что способствует образованию Al_3Zr при охлаждении и кристаллизации расплава.

Постановка задачи

С целью подтверждения возможности использования фторида циркония для насыщения алюминиево-кремниевых сплавов цирконием, который выступает в качестве модификатора сплавов системы Al-Si-Cu, было исследовано изменение механических свойств и микроструктуры сплава АК5М.

Результаты исследований

Исследование микроструктуры литейного алюминиево-кремниевого сплава АК5М выполнено на растровом электронном микроскопе РЭМ 106И.

Согласно диаграмме состояния Al-Si- Zr [4], в системах, имеющих в своем составе кремний и цирконий, возможно образование тех или иных силицидов циркония. В алюминиевом расплаве при определенном содержании кремния

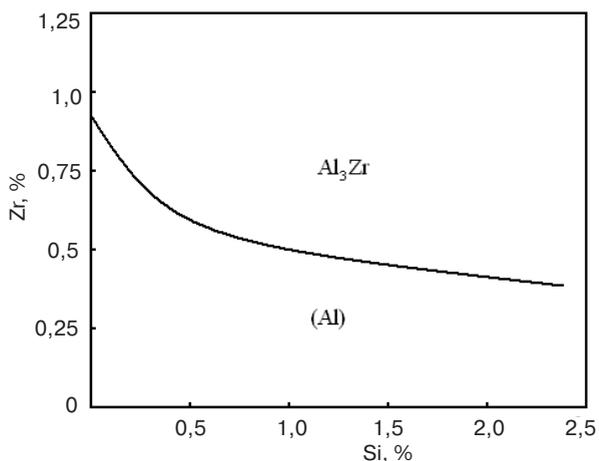


Рис. 2. Граница областей первичной кристаллизации в системе Al-Zr-Si

(> 7 %мас.) при неравновесной кристаллизации возможно образование, по границам зерен, дисилицида циркония ($ZrSi_2$), который может растворять в своем составе до 9 % алюминия [4]. Это объясняет наличие алюминия в данном силициде, которое выявлено в результате рентгеноспектральных исследований. Из-за того, что эти выделения являются хрупкой фазовой составляющей алюминиево-кремниевых литейных сплавов, уровень механических характеристик при определенном содержании циркония в этих сплавах может снижаться.

Однако, согласно [5], кремний почти не растворяется в алюминиде циркония, а следовательно, не может изменять количество первичных кристаллов Al_3Zr , которые образовались при технологическом способе получения Al-Si сплавов, включающем в себя раздельное насыщения алюминия цирконием с последующим ведением в него с помощью лигатуры определенного количества кремния. Более того, наличие кремния в сплаве, содержащем Al_3Zr , способствует, в результате термической обработки, образованию вторичных зерен Al_3Zr пластинчатой формы [5], упрочняющих термообработанный сплав.

Микроструктура алюминиево-кремниевый литейного сплава АК5М представлена на рис. 3-6. Сплав представляет собой раствор кремния и меди в алюминии и две фазы, сосредоточенные на границах зерен. В случае сплава, содержащего 2,5 % ZrF_4 , термообработанного по режиму Т1, первая фаза – это зерна эвтектики размером до 5 мкм. Вторая фаза представляет собой пластины соединения, которое по своему составу приближается к Al_3Zr , значительного по размеру – 30 мкм. Вышеуказанный сплав после термообработки по режиму Т5 отличается тем, что пластины соединения Al_3Zr измельчаются до размеров 5-10 мкм, и кроме них соединение Al_3Zr может быть представлено на структуре сплава АК5М выделениями игольчатой формы. Зерна эвтектики после термообработки по режиму Т5 отсутствуют. Всего в сплав удалось перевести 1,06 % циркония.

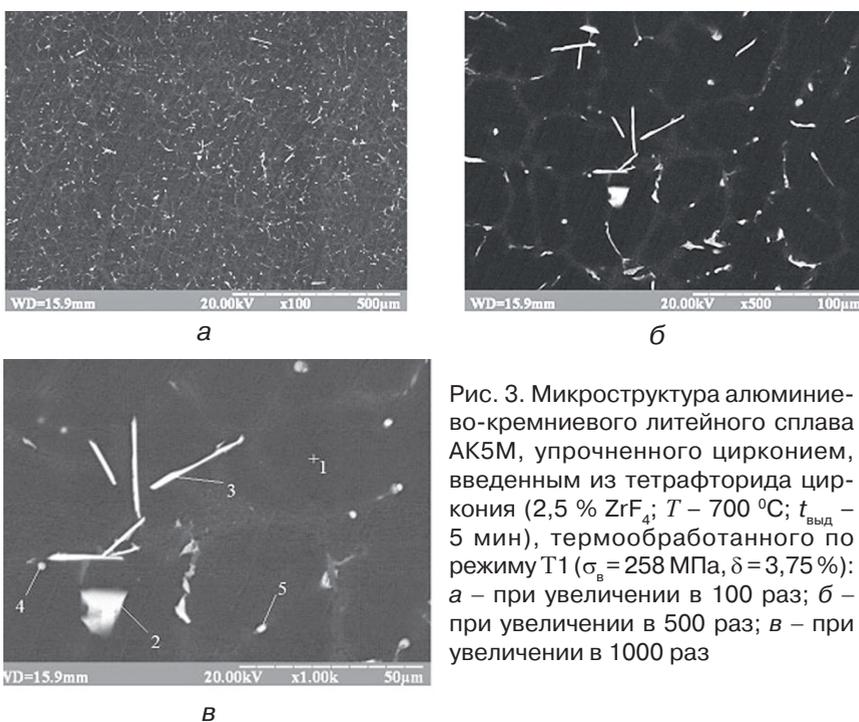


Рис. 3. Микроструктура алюминиево-кремниевый литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (2,5 % ZrF_4 ; $T - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{выд}} - 5\text{ мин}$), термообработанного по режиму Т1 ($\sigma_{\text{в}} = 258\text{ МПа}$, $\delta = 3,75\%$): а – при увеличении в 100 раз; б – при увеличении в 500 раз; в – при увеличении в 1000 раз

При введении в сплав 1,7 % ZrF_4 , температуре 900 °С и времени выдержки 15 мин структура АК5М подобная вышеуказанной. Химический состав структурных составляющих приведен в табл. 1-4.

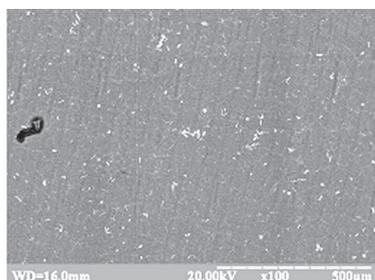
Химический состав структурных составляющих алюминиево-кремниевый литей-

Кристаллизация и структурообразование сплавов

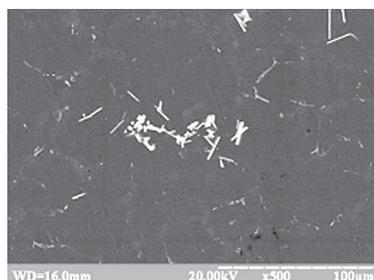
ного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (рис. 3, в), приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сплава АК5М, модифицированного 2,5 % ZrF₄ после термообработки Т1

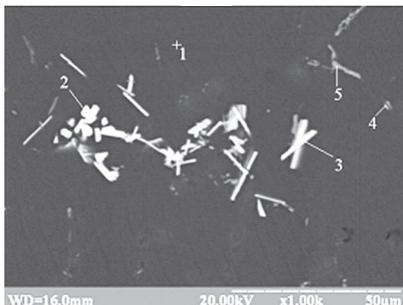
Точка исследований	Содержание элементов, %				
	Al	Si	Cu	Mg	Zr
1	98,66	0,83	0,51	–	–
2	43,71	6,71	0,65	0,15	48,78
3	45,43	10,44	0,29	0,42	43,43
4	62,37	3,72	33,69	0,22	–
5	55,53	4,32	38,04	2,11	–



а



б



в

Рис. 4. Микроструктура алюминий-кремниевого литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (2,5 % ZrF₄; T – 700 °С, t_{выд} – 5 мин), термообработанного по режиму Т5 (σ_в = 334 МПа, δ = 3,17 %): а – при увеличении в 100 раз; б – при увеличении в 500 раз; в – при увеличении в 1000 раз

Таблица 2. Химический состав сплава АК5М, модифицированного 2,5 % ZrF₄ после термообработки Т5

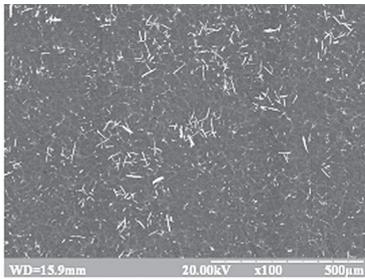
Точка исследований	Содержание элементов, %				
	Al	Si	Cu	Mg	Zr
1	98,1	0,82	0,45	0,19	0,43
2	38,4	7,74	0,51	0,32	53,03
3	23,76	28,96	0,34	0,42	46,52
4	88,06	4,84	1,95	0,36	4,78
5*	60,79	9,52	0,63	0,33	–

*28,73 % Fe

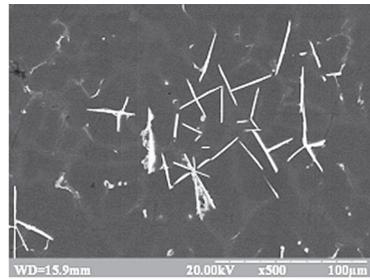
Кристаллизация и структурообразование сплавов

Химический состав структурных составляющих алюминиево-кремниевого литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (рис. 4, в), приведен в табл. 2.

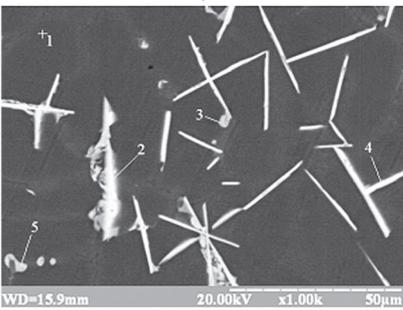
Химический состав структурных составляющих алюминиево-кремниевого литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (рис. 5, в), приведен в табл. 3.



a



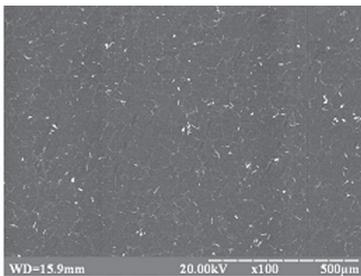
б



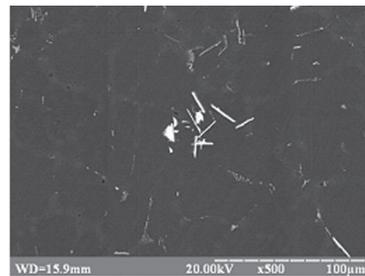
в

Рис. 5. Микроструктура алюминиево-кремниевого литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (1,7 % ZrF_4 ; $T = 900\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{выд}}$ – 15 мин), термообработанного по режиму Т1 ($\sigma_B = 255\text{ МПа}$, $\delta = 3,58\%$): *a* – при увеличении в 100 раз; *б* – при увеличении в 500 раз; *в* – при увеличении в 1000 раз

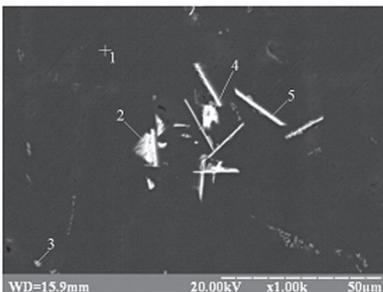
Химический состав структурных составляющих алюминиево-кремниевого литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (рис. 6, в), приведен в табл. 4.



a



б



в

Рис. 6. Микроструктура алюминиево-кремниевого литейного сплава АК5М, упрочненного цирконием, введенным из тетрафторида циркония (1,7 % ZrF_4 ; $T = 700\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{выд}}$ – 15 мин), термообработанного по режиму Т5 ($\sigma_B = 339\text{ МПа}$, $\delta = 0,83\%$): *a* – при увеличении в 100 раз; *б* – при увеличении в 500 раз; *в* – при увеличении в 1000 раз

Таблица 3. Химический состав сплава АК5М, модифицированного 2,5 % ZrF₄ после термообработки Т1

Точка исследований	Содержание элементов, %				
	Al	Si	Cu	Mg	Zr
1	98,44	0,96	0,25	0,35	–
2	43,99	7,01	3,03	0,75	45,21
3	31,11	3,6	64,69	0,4	–
4	59,16	13,49	0,25	–	27,1
5	28,09	1,77	69,74	0,4	–

Таблица 4. Химический состав сплава АК5М, модифицированного 2,5 % ZrF₄ после термообработки Т5

Точка исследований	Содержание элементов, %				
	Al	Si	Cu	Mg	Zr
1	98,28	0,91	0,47	0,35	–
2	20,02	29,18	0,36	–	50,44
3*	74,68	5,12	2,4	0,13	–
4	21,75	30,39	0,73	0,65	46,47
5**	39,34	25,16	–	0,13	35,09

*17,68 % Fe, **0,28 % Fe

Выводы

Цирконий, который введен в расплав литейного алюминиево-кремниевого сплава АК5М сплава из смеси, содержащей в своем составе фторид циркония, после термообработки за режимами Т1 и Т5 сосредоточен на границах зерен α-фазы в виде отдельных кристаллов фазы Al₃Zr игловидной или пластинчатой формы.



Список литературы

1. *Стеценко В. Ю.* Об основополагающем принципе теории модифицирования сплавов // *Литье и металлургия.* – 2009. – № 4. – С. 68-71.
2. *Килин А. Б.* Влияние электрического тока на дегазацию и модифицирование алюминиевых сплавов / А. Б. Килин // *Литейное производство.* – 2002. – № 8. – С. 21-22.
3. *Белов Н. А.* Влияние циркония на структуру и механические свойства микролегированных сплавов системы Al-Fe-Si / Н. А. Белов, В. В. Истомина-Кастровский, А. Н. Алабин // *Известия вузов. Цветная металлургия.* – 2003. – № 4. – С. 54-60.
4. *Petzow G.* «Aluminium – silicon – zirconium» Ternary alloys / Petzow G., Effenberg G. – Verlag Chemie, Weinheim, Germany, 1993. – Vol. 7. – P. 2-12.
5. *Litynska L.* TEM and HREM study of Al₃Zr precipitates in an AlMgSiZr alloy / L. Litynska, D. Abou-Ras, G. Kostorz, J. Dutkiewicz // *Journal of Microscopy.* – 2006. – Vol. 223. – P. 182-184.



References

1. *Stetzenko V. Y.* (2009) Ob osnovopolagayushchem printsipe teorii modifitsirovaniya splavov [On fundamental principle of the alloys modification theory]. Casting and metallurgy, no. 4, pp. 68-71. [in Russian].
2. *Kilin A. B.* (2002) Vliyaniye elektricheskogo toka na degazatsiyu i modifitsirovaniye alyuminievykh splavov [Effect of electric current on degassing and modifying aluminum alloys]. Foundry, no.8, pp. 21-22. [in Russian].
3. *Belov N. A., Istomin-Kastrovsky V. V., Alabin A. N.* (2003) Vliyaniye tsirkoniya na strukturu i mekhanicheskie svoystva mikrolegirovannykh splavov sistemy Al-Fe-Si [The effect of zirconium on structure and mechanical properties of low alloys of the Al-Fe-Si system]. Universities' proceedings. Nonferrous Metallurgy, no. 4, pp. 54-60. [in Russian].
4. *Petzow G., Effenberg G.* (1993) «Aluminium-silicon-zirconium» Ternary alloys. Verlag Chemie, Weinheim, Germany, vol. 7, pp. 2-12. [in English].
5. *Litynska L., Abou-Ras D., Kostorz G., Dutkiewicz J.* (2006) TEM and HREM study of Al₃Zr precipitates in an Al-Mg-Si-Zr alloy. Journal of Microscopy, vol. 223, pp. 182-184. [in English].

Поступила 21.03.2017

ВНИМАНИЕ!

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 6000 грн.

**Расценки на размещение рекламы
(цены приведены в гривнях)**

Размещение	Рекламная площадь	Стоимость, грн.
Рекламные блоки в текстовой части журнала		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
Цветная реклама на обложке		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

При повторном размещении рекламы - скидка 10 %

Наш адрес: **Украина, 03142, г. Киев-142 Вернадского, 34/1**
 Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
телефон: (044) 424-04-10
факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua