

Куцова В. З. /д. т. н./, Свиначенко Е. И., Дмитриева Т. Б.  
Национальная металлургическая академия Украины

## Микроструктура сплава Al-7Si, содержащего комплекс Ti-B-Sr, после воздействия на расплав вращающегося магнитного поля

В работе исследовано влияние модифицирования комплексом Ti-B-Sr с последующей обработкой расплава во вращающемся магнитном поле на конечную структуру силумина Al-7Si в литом состоянии. Определены изменения таких структурных параметров, как междендритное расстояние  $\alpha$ -Al твердого раствора, объемная доля  $\alpha$ -Al твердого раствора и параметр формы эвтектического кремния. На основании результатов количественной металлографии сделаны выводы о характере влияния комплексной физико-химической обработки на структуру исходного сплава. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** доэвтектический силумин, модифицирование, вращающееся магнитное поле, эвтектика, объемная доля фаз, параметр формы

*Effect of Ti-B-Sr modifying complex with further melt treatment under Rotating Magnetic Field on as-cast Al-7Si alloy microstructure is studied. Changes in structural parameters such as secondary dendritic arms spacing (SDAS) of  $\alpha$ -Al solid solution,  $\alpha$ -Al solid solution volume fraction and eutectic silicon shape parameter are characterized and analyzed. Based on quantitative metallography results conclusions about effect of complexly applied chemical inoculation and physical field on initial alloy structure are made.*

**Keywords:** hypoeutectic Al-Si alloy, modification, rotating magnetic field, eutectic, phase volume fraction, shape parameter

### Введение

В последние годы в автомобильной, авиационной и судостроительной промышленности значительно вырос спрос на литые детали и заготовки из силуминов. Это связано, в первую очередь, с благоприятным комплексом технологических и эксплуатационных свойств этих сплавов, а также с возможностью уменьшать массу конструкций.

Хорошо известно, что механические свойства силуминов в значительной степени зависят от морфологии эвтектической составляющей структуры сплава. Однако эвтектический кремний в литом, необработанном сплаве зачастую кристаллизуется в виде грубых слабоветвленных кристаллов, что сказывается на показателях механических свойств силуминов, особенно пластичности. Изменение морфологии эвтектического кремния с грубой игольчатой на более благоприятную, волокнистую, приводит к значительному приросту механических свойств отливок из этих сплавов.

Структура и свойства силуминов могут быть значительно улучшены за счет введения малых добавок модифицирующих элементов или за счет оптимизации параметров физических методов воздействия на расплав, таких как ультразвуковая обработка, электромагнитное перемешивание, пульсирующее магнитное поле и т. д.

Эффект модифицирования титаном, бором и стронцием на структурообразование и механические свойства доэвтектических силуминов хорошо изучен и применяется в производстве отливок из этих сплавов [1].

Использование магнитных полей в процессе кристаллизации широко применяется в литейном производстве с целью измельчения зерна, перераспределения элементов в расплаве и повышения качества поверхности отливок [2].

Взаимодействие вращающегося магнитного поля (ВМП) с жидким металлом можно объяснить возникновением токов Эдди и их столкновением со свободным электрическим зарядом в расплаве, результирующем в силе Лоренца, способной перемещать жидкие массы [3, 4].

В литературе практически нет данных о комплексном воздействии химического модифицирования и магнитных полей на микроструктуру и свойства доэвтектических силуминов. Поэтому целью данной работы является изучение закономерностей структурообразования сплава Al-7Si после модифицирования комплексом Ti-B-Sr и обработки расплава вращающимся магнитным полем.

### Материал и методика

В работе исследован литой сплав типа Al-7Si в исходном, модифицированном комплексом

Ti-B-Sr, а также после обработки расплава ВМП. Параметры обработки и маркировка экспериментальных сплавов приведены в таблице. Для выплавки сплава Al-7Si использовали алюминий чистотой 99,7 % и сплав Al-30Si. Модифицирование осуществляли введением лигатур Al-5Ti-1B и Al-10Sr. Выплавляли экспериментальные сплавы в печи сопротивления при температуре 760-780 °С. Лигатуру Al-5Ti-1B вводили при температуре 780 °С, лигатуру Al-10Sr – 750 °С. Выдержка сплава после введения модификаторов 10 мин. Расплав заливали в предварительно подогретый графитовый тигель при температуре 720 °С. Наложение ВМП осуществляли при температуре 645±5 °С. В процессе экспериментов регулировали напряжение электрического тока в экспериментальной установке на уровне 20 В и 40 В, что соответствует интенсивности магнитного поля, равной 6 мТл и 12 мТл, соответственно. Частота вращения магнитного поля 5 Гц. Исследования микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа. Количественные параметры структуры определяли стандартными методами количественной металлографии.

Таблица

Маркировка экспериментальных сплавов в зависимости от параметров модифицирования и ВМП

Напряжение в установке	Параметры модифицирования				
	-	0.025 % Ti-0.005 % В	0.005 % Sr	0.025 % Ti-0.005 % В+0.005 % Sr	
	0	1	2	3	
0 В	0	00	01	02	03
20 В	2	20	21	22	23
40 В	4	40	41	42	43

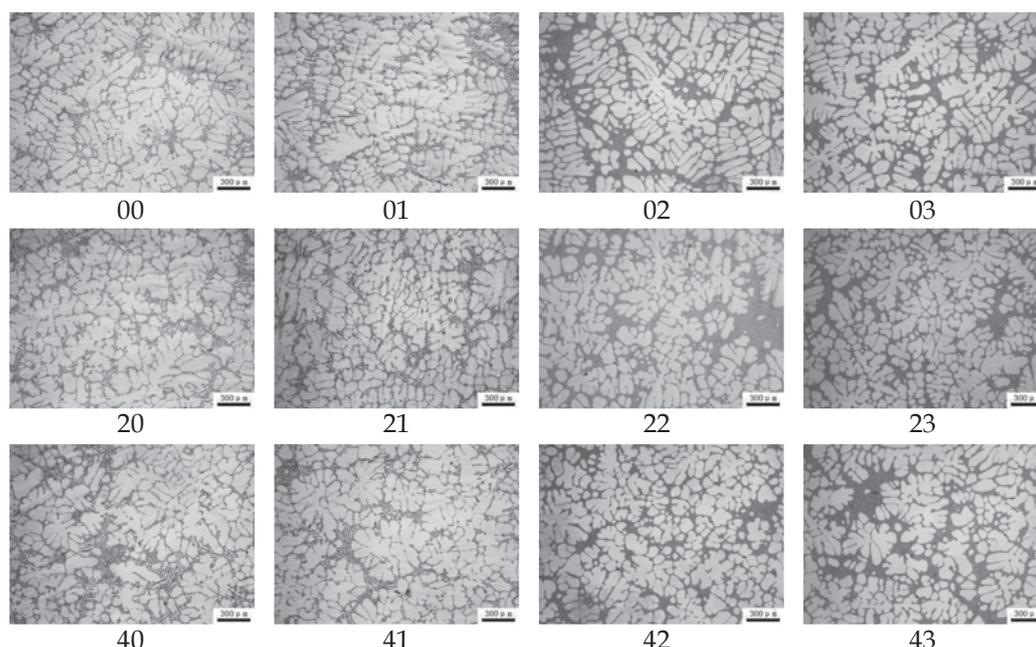


Рис. 1. Микроструктура сплава Al-7Si при разных режимах модифицирования и ВМП, ×500

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены микроструктуры сплавов в исходном и обработанном по различным режимам состояниях. Анализ микроструктур позволяет определить влияние различных параметров химико-физической обработки на морфологию дендритов  $\alpha$ -Al твердого раствора. Структура исходного сплава (рис. 1: 00) характеризуется наличием грубых слабоветвленных дендритов первичного алюминия, хорошо видны оси дендритов, а также ветви второго порядка. Модифицирование без последующего наложения ВМП (рис. 1: 01-03) оказывает незначительное влияние на морфологию дендритов  $\alpha$ -Al твердого раствора. Применение вращающегося магнитного поля интенсивностью 6 мТл (рис. 1: 20-23) приводит к заметным изменениям морфологии дендритов алюминиевого твердого раствора – на месте грубых, строго упорядоченных дендритных кристаллов с вытянутыми осями, растут кристаллы, оси которых намного короче. Наиболее благоприятная структура характерна для образцов, модифицированных добавками Ti-B (рис. 1: 21, 23). Вероятно, это связано с тем, что частицы  $TiAl_3$  и  $TiB_2$ , привносимые лигатурой Al-5Ti-1B, служат гетерогенными зародышами для алюминиевой фазы в процессе кристаллизации сплава. Повышение интенсивности магнитного поля до 12 мТл при совместном модифицировании добавками Al-5Ti-1B приводит к формированию дендритов формы, приближенной к равновесной (рис. 1: 41, 43). Кроме того, прослеживается укрупнение сечения ветвей дендритов.

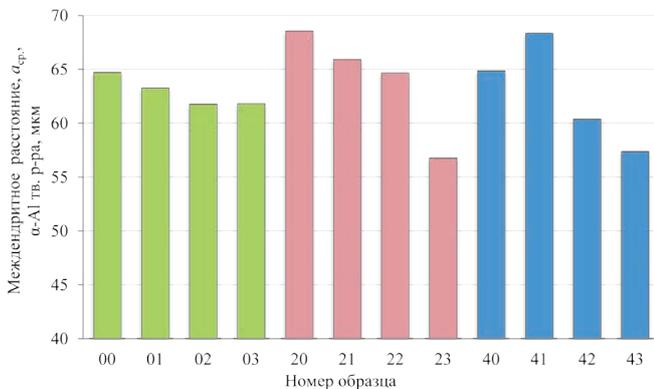
На рис. 2 представлены результаты измерения междендритного расстояния  $\alpha$ -Al твердо-

го раствора в сплаве Al-7Si после обработки при разных режимах модифицирования и ВМП. Исследуемый параметр  $a_{cp}$  исходного сплава составляет 64,7 мкм. Модифицирование добавками Ti-B и Sr без последующего наложения ВМП оказывают незначительное влияние на данную величину, которая составляет 63,3 мкм, 61,8 мкм и 61,9 мкм для образцов 01, 02, 03, соответственно. Наложение магнитного поля интенсивностью 6 мТл на исходный, немодифицированный сплав приводит к росту междендритного расстояния на 6 % до уровня 68,6 мкм (образец 20). Введение добавок модификаторов способствует уменьшению значений  $a_{cp}$ . При этом в случае некомплексного модифицирования наблюдается тенденция, при которой стронций оказывает более сильное влияние на уменьшение исследуемого параметра независимо от параметров ВМП. Однако наиболее сильный эффект модифицирования характерен при комплексном введении титана, бора и стронция – образцы 23 и 43,  $a_{cp}$  при этом составляет 56,8 мкм и 57,4 мкм, соответственно, что на 12,2 % и 11,3 % меньше исследуемого параметра исходного сплава и на 8,3 % и 7,3 % меньше междендритного расстояния комплексно модифицированного сплава, выплавленного без применения ВМП (образец 03). Таким образом, наложение вращающегося магнитного поля дополнительно интенсифицирует эффект измельчения структуры дендритов алюминиевой фазы химическими модификаторами.

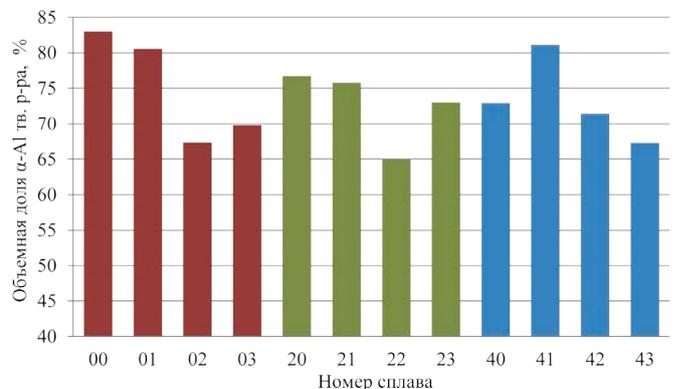
Рис. 3 иллюстрирует влияние различных режимов химико-физической обработки на объемную долю  $\alpha$ -Al твердого раствора в структуре сплава Al-7Si. В силу того, что эвтектика является структурной составляющей, отвечающей, в первую очередь, за пластичность сплава, уменьшение объемной доли  $\alpha$ -Al твердого раствора и, соответственно, увеличение объемной доли эв-

тектики в структуре силуминов приводит к росту пластических характеристик этих сплавов. Объемная доля  $\alpha$ -Al твердого раствора в структуре необработанного сплава Al-7Si составляет 83 %. Наложение магнитного поля без введения титана, бора или стронция способствует уменьшению доли алюминиевого твердого раствора в структуре сплава до значений 76,7 % и 73 % для образцов, закристаллизованных под ВМП интенсивностью 6 мТл и 12 мТл, соответственно, что на 6,7 % и 12,1 % меньше данного параметра для исходного сплава. Анализ гистограммы свидетельствует о том, что характер влияния химического модифицирования на исследуемый параметр меняется в зависимости от интенсивности приложенного ВМП. Так, присадки титана и бора (образец 01) незначительно увеличивают долю эвтектики и интерметаллидов в структуре сплава по сравнению с исходным сплавом – до уровня 19,5 %. Аналогично ведет себя комплекс титан-бор и в случае сплавов, закристаллизованных под действием магнитного поля интенсивностью 6 мТл – объемная доля эвтектики в структуре образца 21 увеличилась на 4,3 % по сравнению с величиной данного параметра для сплава 20 (23,3 %) до уровня 24,2 %. Однако, с увеличением интенсивности до 12 мТл доля эвтектики и интерметаллидов в структуре сплава, модифицированного присадками титана и бора, уменьшается по сравнению с данным показателем немодифицированного сплава (27,1 %) до 18,9 %.

Присадки стронция оказывают наиболее сильное влияние на изменение объемной доли фаз в структуре исследуемого сплава. Это, скорее всего, связано с тем, что этот элемент коренным образом меняет морфологию эвтектического кремния, металлизировав его межатомные связи. При этом модифицированный сплав, закристаллизованный под магнитным полем интенсивностью 12 мТл, характеризуется увели-



**Рис. 2. Влияние различных режимов модифицирования и ВМП на междендритное расстояние  $\alpha$ -Al твердого раствора в структуре сплава Al-7Si**



**Рис. 3. Влияние различных режимов модифицирования и ВМП на объемную долю  $\alpha$ -Al тв. р-ра в структуре сплава Al-7Si**

ченной по сравнению со сплавами 03 и 23 долей алюминиевой фазы в структуре.

Объемная доля  $\alpha$ -Al твердого раствора для сплавов 03, 23 и 43 составляет 67,4 %, 65 % и 71,4 %, соответственно. Объемная доля  $\alpha$ -Al твердого раствора в сплаве 23 на 21,7 % меньше соответственного значения для исходного необработанного сплава Al-7Si, что является наименьшим значением среди всех экспериментальных сплавов. Введение титана, бора и стронция в комплексе характеризуется увеличением объемной доли эвтектики и интерметаллидов в структуре сплава. Однако эффект менее значителен, чем в случае модифицирования только стронцием. Более того, с наложением дополнительно ВМП интенсивностью 6 мТл данный показатель растет от 69,8 % для сплава 03 до 73 % для сплава 23. Увеличение интенсивности МП до 12 мТл приводит к образованию алюминиевой фазы в структуре сплава объемной долей 67,3 %.

Рис. 4 иллюстрирует изменения в морфологии эвтектики исследуемого сплава под воздействием различных режимов химико-физической обработки.

Эвтектика исходного сплава (см. рис. 4: 00), а также сплава, модифицированного титаном и бором (см. рис. 4: 01) грубодифференцирована и имеет пластинчатое строение [5]. Общий анализ приведенных микроструктур свидетельствует о том, что наложение магнитного поля без введения присадок стронция не достаточно эффективно воздействует на морфологию эвтектического кремния (рис. 4: 20, 21, 40, 41). В случае сплавов, обработанных МП интенсивностью 6 мТл, параметр формы эвтектиче-

ского кремния уменьшается на 20-35 % по сравнению с аналогичными сплавами, кристаллизация которых проходила без воздействия ВМП (см. рис. 5: 00, 01, 20, 21).

Эвтектика сплава Al-7Si, закристаллизованного при воздействии ВМП интенсивностью 12 мТл становится более грубодифференцированной,  $P_f$  растет на 33,4 % до значения 14,8 по сравнению с исходным сплавом (см. рис. 5: 40). Намного более эффективными являются в данном случае присадки стронция. Морфология эвтектики меняется с пластинчатой на волокнистую, а разрез включений кремния принимает форму, близкую к равноосной с параметром формы 2,1 и 1,8 для образцов 02 и 03, соответственно, что в 6,5 раз меньше аналогичных данных для исходного сплава.

При этом интенсивность ВМП и введение присадок бора и титана не отражаются на значениях исследуемого параметра в сплавах, модифицированных стронцием.  $P_f$  остается на уровне, близком к 2,5 (см. рис. 5: 02, 03, 22, 23, 42, 43). Однако, структура сплавов, закристаллизованных под действием ВМП интенсивностью 12 мТл, характеризуется наличием кристаллов интерметаллидов или первичного кремния (см. рис. 4: 42, 43). Данное явление наблюдается при обработке расплавов вращающимся магнитным полем и часто используется для очистки сплавов от нежелательных примесей [6, 7]. Однако в данном случае оно может негативно сказаться на комплексе механических свойств сплава, а также привести к анизотропии свойств по разным направлениям.

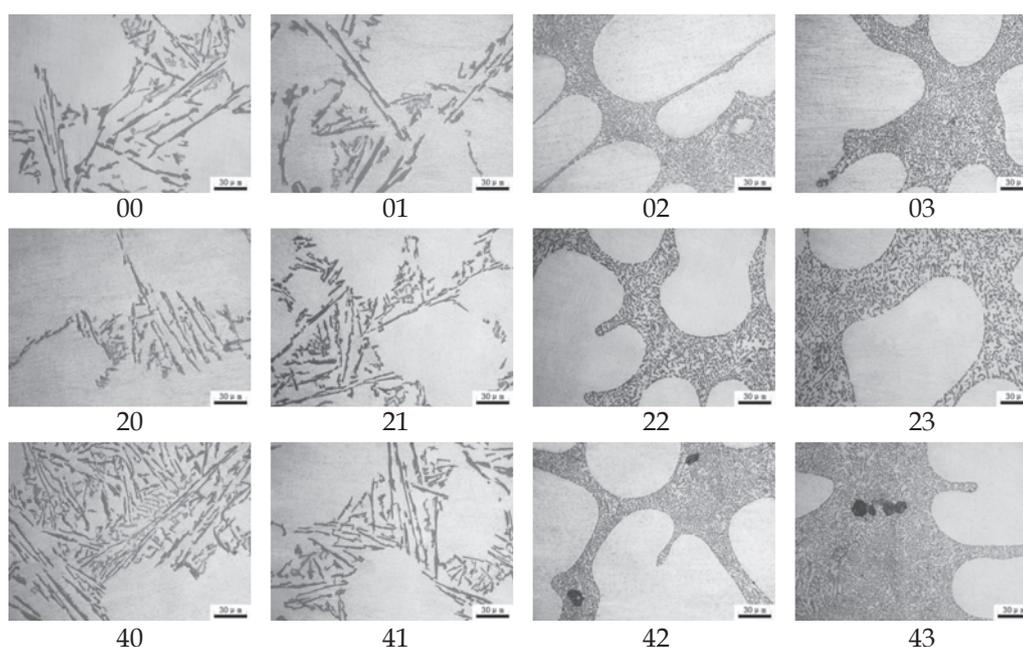
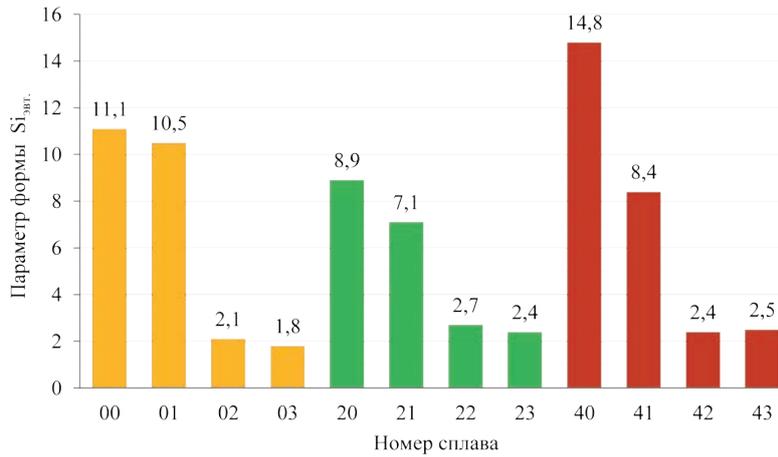


Рис. 4. Микроструктура сплава Al-7Si при разных режимах модифицирования и ВМП,  $\times 500$



**Рис. 5. Влияние различных режимов модифицирования и ВМП на параметр формы эвтектического кремния в структуре сплава Al-7Si**

**Выводы**

Исследовано влияние модифицирования, вращающегося магнитного поля и комплексного химико-физического воздействия на расплав силумина Al-7Si и конечную структуру литого сплава. Установлено, что комплексная химико-физическая обработка расплава приводит к формированию более благоприятной структуры сплава. Результаты показали, что ВМП интенсивностью 6 мТл положительно воздействует на морфологию дендритов первичного алюминия, способствуя в комплексе с добавками титана и бора образованию структуры, близкой к недендритной. Воздействие комплексом Ti-B-Sr с последующим приложением ВМП интенсивностью 6 мТл приводит к уменьшению междендритного расстояния α-Al твердого раствора на 12,2 % по сравнению с аналогичным параметром исходного сплава до уровня 56,7 мкм. Модифицирование стронцием приводит к значительным изменениям морфологии эвтектики сплава, которая меняется с грубодифференцированной игольчатой на тонкодифференцированную волокнистую. Параметр формы эвтектического кремния в этом случае, независимо от изменения других параметров химико-физической обработки расплава, уменьшается в 6,5 раз. Наблюдаемые изменения структуры силуминов при обработке ВМП и модифицировании комплексом Ti-B-Sr обеспечат улучшение комплекса механических свойств исследуемого сплава.

**Библиографический список**

1. Куцова В. З. Структура и свойства доэвтектических силуминов, модифицированных комплексом Ti-B-Sr / В. З. Куцова, А. С. Елагин, Е. И. Свиженко // Металознавство та термічна

обробка металів: науков. та інформ. журнал / ПДАБА, Дн-ськ. – 2011. – № 1-2 (52-53). – С. 310-318.

2. Davidson P. A. Magnetohydrodynamics in materials processing. *Annu Rev Fluid Mech* 1999; 31: 273-300.

3. Iwai K, Wan J, Kohama T. Solidified structure control of metallic alloy using electromagnetic field. In: *EPM2009, 6<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*. – 2009.

4. Yang Y, Wang B, Ma X, Tong W, Li Y, Luo T, et al. Crystal Growth and grain refinement by pulsed magnetic field. In: *EPM 2009, 6<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*. – 2009.

5. Куцова В. З. Влияние комплексной физико-химической обработки расплава на распределение легирующих элементов в силуминах типа АК7ч / В. З. Куцова, Т. А. Аюпова, О. А. Носко, А. С. Елагин, А. И. Тацкова // *New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. Series: Monographs, № 24: тезисы докладов – Czestochowa, Poland*. – 2012. – С. 243-251.

6. Куцова В. З. Влияние комплексного модифицирования, термической обработки в жидком состоянии на структуру и свойства сплава АК7ч / В. З. Куцова, А. С. Елагин // *Новини науки Придніпров'я. – ДВНЗ ПДАБА*. – 2012. – № 2. – С. 13-16.

7. Yanjie He, Qiulin Li, Wei Liu. Effect of combined magnetic field on the eliminating inclusions from liquid aluminum alloy // *Materials Letters*. – 2011. (65). – 1226-1228.

**Поступила 02.10.2014**