

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИГАТУРЫ AlTi НА ЕЕ СТРУКТУРУ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2018 г. **К.В. Никитин, И.Ю. Тимошкин, В.И. Никитин**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

Статья поступила в редакцию 04.09.17 г., доработана 11.11.17 г., подписана в печать 17.11.17 г.

Выполнено сравнительное исследование по влиянию способов получения модифицирующих лигатур AlTi₄ на размеры интерметаллидов Al₃Ti. Установлено, что повышение скорости охлаждения при затвердевании с 10–15 °C/с (кристаллизация в горячей чугунной изложнице, пластина толщиной 30 мм) до 60–65 °C/с (кристаллизация в холодном чугунном кокиле, пруток диаметром 20 мм, длиной 170 мм) способствует уменьшению длины и толщины игольчатых интерметаллидов практически в 2 раза (с 397×23 до 215×13 мкм). При этом отмечается снижение значений электропроводности и увеличение плотности лигатуры в твердом состоянии. Модифицирование лигатурного расплава добавкой магния в количестве 0,5 мас.% обуславливает формирование однородных мелкоигольчатых интерметаллидов размерами 98×3 мкм. Добавка магния незначительно снижает электропроводность и плотность по сравнению с лигатурой AlTi₄, закристаллизованной при одинаковой скорости охлаждения (60–65 °C/с). Модифицирование указанными лигатурами алюминия марки А97 и сплава АК9ч (система Al–Si–Mg) при одинаковом количестве вводимого титана (0,01 мас.%) оказывает наследственное влияние на плотность и электропроводность, а также на макрозерно (А97) и дендриты алюминия (АК9ч). Максимальным модифицирующим эффектом характеризуется лигатура AlTi₄, содержащая магний в количестве 0,5 мас.%. Ее введение в сплав способствует формированию в его структуре дендритов алюминия размером 10 мкм в количестве 1427 шт./мм². При модифицировании сплава АК9ч лигатурой, закристаллизованной со скоростями охлаждения 10–15 °C/с, в структуре сплава формируются дендриты размером 28 мкм в количестве 672 шт./мм². Методики определения плотности и электропроводности предлагается использовать для экспрессной оценки модифицирующей эффективности лигатур.

Ключевые слова: лигатуры AlTi₄, интерметаллиды Al₃Ti, модифицирование, наследственное влияние структуры лигатур, алюминий, сплав системы Al–Si–Mg, макроструктура, микроструктура, плотность, электропроводность.

Никитин К.В. – докт. техн. наук, доцент, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта Самарского государственного технического университета (СамГТУ) (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244).
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Тимошкин И.Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ.
E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Никитин В.И. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Литейные и высокоэффективные технологии» СамГТУ.
E-mail: tlp@samgtu.ru.

Для цитирования: Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Никитин В.И. Влияние способов получения лигатуры AlTi на ее структуру и эффективность при модифицировании алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 4. С. 45–52. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-4-45-52.

Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu., Nikitin V.I.

Influence of methods for AlTi master alloy production on its structure and efficiency in aluminum alloy modification

A comparative study on the effect of methods for obtaining AlTi₄ modifying master alloys on the sizes of Al₃Ti intermetallics is made. It is found that increasing cooling rates at solidification from 10–15 °C/s (crystallization in a hot cast iron mold, a plate 30 mm in thickness) to 60–65 °C/s (crystallization in a cold cast iron chill mold, a rod 20 mm in diameter, 170 mm in length) reduces the length and thickness of needle-shaped intermetallics almost twice (397×23 to 215×13 μm). At the same time, lower electrical conductivity and higher alloy density in a solid state are observed. Melt modification with 0,5 wt.% magnesium addition causes the formation of homogeneous 98×3 μm fine-needle intermetallics. The addition of magnesium slightly reduces electrical conductivity and density compared with the AlTi₄ master alloy crystallized at the same cooling rate (60–65 °C/s). Modification of A97 grade aluminum and АК9ch alloy (Al–Si–Mg system) with the specified master alloys at the same amount of titanium added (0,01 wt.%) exerts hereditary influence on the density and electrical conductivity, and macrograin (A97) and dendrites of aluminium (АК9ch). The maximum modifying effect is provided by the AlTi₄ master alloy containing 0,5 wt.% magnesium. When introduced into the alloy, it contributes

to the formation of 10 μm aluminum dendrites 1427 pcs/mm² in total in the alloy structure. When the AK9ch alloy is modified with the master alloy crystallized at cooling rates of 10–15 °C/s, 28 μm dendrites 672 pcs/mm² in total are formed in the alloy structure. It is suggested to use density and electrical conductivity determination methods for express evaluation of master alloy modifying effectiveness.

Keywords: AlTi₄ master alloys, Al₃Ti intermetallics, modifying, hereditary effect of the structure of master-alloys, aluminum, Al–Si–Mg alloy, macrostructure, microstructure, density, electrical conductivity.

Nikitin K.V. – Dr. Sci. (Tech.), Associate prof., Dean of the Faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport, Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244).
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Timoshkin I.Yu. – Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.
E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Nikitin V.I. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.
E-mail: tlp@samgtu.ru.

Citation: Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu., Nikitin V.I. Vliyanie sposobov polucheniya ligatury AlTi na ee strukturu i effektivnost' pri modifitsirovani alyuminievykh splavov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 4. P. 45–52.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-4-45-52.

Введение

Модифицирование структуры добавками модификаторов с металлической матрицей является одной из основных технологических операций с целью повышения технологических и физико-механических свойств алюминия и сплавов на его основе, а также предметом многочисленных научных исследований, например [1–3]. Параметры макро- и микроstructures алюминиевых сплавов при одинаковом химическом составе являются ключевыми факторами, определяющими уровень комплекса свойств литых изделий.

Измельченная и однородная микроstructure снижает склонность к горячим трещинам слитков из алюминиевых деформируемых сплавов различных систем [4, 5]. Например, с целью обеспечения требуемых механических и эксплуатационных свойств для модифицирования структуры деформируемых сплавов системы Al–Mg широко применяются зародышеобразующие лигатуры на основе алюминия с добавками циркония, титана и скандия [5–11].

Введение модификаторов с металлической матрицей активно применяется для измельчения структуры литейных сплавов системы Al–Si. В работах [11, 12] приводится глубокий научно-практический обзор по модифицированию силуминов. Показано, что модифицирование может уменьшать продолжительность термообработки для термоупрочняемых силуминов. Измельчение основных фаз (дендритов алюминия, эвтектики) способствует снижению газоусадочной пористости промышленных силуминов [11, 13]. В работе [14]

установлено, что модифицирование заэвтектического силумина Al–17%¹Si с позиции явления структурной наследственности добавками мелкокристаллических модификаторов способствует формированию компактных кристаллов первичного кремния блочной морфологии и мелкодисперсного эвтектического кремния.

По-прежнему большое внимание исследователей уделяется разработкам новых составов модификаторов с металлической матрицей [2, 13, 15]. В данном направлении можно отметить, что в основном изучается влияние лигатур Al–Ti и Al–Ti–B с различным содержанием титана и соотношением титан/бор. Однако в работах [2, 15] отмечается, что перспективными модификаторами для алюминиевых сплавов могут являться лигатуры Al–6Ti–0,02C, Al–3Ti–0,15C, Al–1Sc, Al–2Sc, а также композиции более сложных составов, например Al–Ti–C–Sr, которые одновременно воздействуют на кристаллы кремния и дендриты алюминия в силуминах. При этом подчеркивается, что наибольшую эффективность имеют прутковые лигатуры, которые получают или твердофазной деформацией из слитков, или совмещенными процессами литья и деформации.

Большинство исследователей уделяют внимание влиянию химических составов лигатур и количеству вводимых модифицирующих элементов

¹ Здесь и далее содержания компонентов приводятся в мас.%.

на эффективность модифицирования алюминиевых сплавов.

С позиции явления структурной наследственности интерес представляют работы китайских ученых [16–19], в которых приводятся результаты исследований по наследственному влиянию структуры лигатуры AlTiC на ее модифицирующую способность [16], влиянию скоростей охлаждения на размеры и морфологию интерметаллидов Al₃Ti в лигатуре AlTi4 [17] и влиянию структуры лигатур AlTi4 и AlTi5 на эффективность модифицирования алюминия технической чистоты [18, 19].

Автором [20] изучалось влияние малых добавок мелкокристаллического переплава на структуру и свойства сплава Al–12%Si. Показано, что их введение оказывает модифицирующее воздействие на структурные составляющие и повышают механические свойства материала.

Большой объем научной информации по влиянию структуры лигатур на структуру и свойства алюминиевых сплавов с позиции явления структурной наследственности изложен в работах, проводимых учеными-литейщиками СамГТУ [21, 22].

Однако анализ зарубежных литературных источников показывает, что по-прежнему мало изучено наследственное влияние структуры модификаторов с металлической матрицей на структуру и свойства модифицируемых сплавов.

В связи с вышесказанным актуальными остаются исследования, направленные на изучение механизмов наследования в системе «модификатор с металлической матрицей — модифицируемый сплав».

Цель работы состояла в исследовании влияния способов получения лигатур AlTi4 на размеры и морфологию интерметаллидов Al₃Ti, а также анализе эффективности лигатур AlTi4 при модифицировании алюминия марки А97 и сплава АК9ч (система Al–Si).

Материалы и методика экспериментов

Эксперименты проводили в Центре литейных технологий СамГТУ в три этапа:

- 1) получение лигатур AlTi4 с различными параметрами (размеры, морфология) интерметаллидов Al₃Ti;
- 2) модифицирование алюминия марки А97 (ГОСТ 11069-2001);
- 3) модифицирование сплава АК9ч (ГОСТ 1583-93).

Получение лигатур AlTi4. Для приготовления лигатур использовали электротехнические отходы алюминия марки А7 в виде проволоки толщиной 3 мм и титан губчатый ТГ-100 (ГОСТ 17746-96) фракцией до 5 мм. Для модифицирования интерметаллидов Al₃Ti в лигатуре применяли магний чушковый марки Мг90 (ГОСТ 804-93). Приготовление лигатур осуществляли на индукционной плавильной установке УИП 16-10-0,01 (производства компании «РЭЛТЕК», г. Екатеринбург, РФ) с емкостью тигля по алюминию 2,5 кг. Температуру в процессе получения лигатурных расплавов контролировали хромель-алюмелевыми термопарами, подсоединенными к многоканальному видеографическому регистрирующему преобразователю Ш9329А. Во время плавки и литья использовали титановый инструмент. Весь плавильный инструмент перед плавкой подогревали до 150 °С и окрашивали противопожарной краской в 3 слоя.

В нагретый до 500 °С тигель загружали алюминий и после его расплавления осуществляли перегрев расплава до 950 °С. Далее вводили губчатый титан двумя порциями под зеркало расплава при постоянном перемешивании. После растворения всей навески титана расплав перегревали до 1050–1100 °С. Рафинирование осуществляли покровно-рафинирующим флюсом производства НПП «Эвтектика» (Республика Беларусь, г. Минск, ТУ РБ 100196035.005-2000) из расчета 0,5 %, выдерживали в течение 20 мин и заливали расплав в горячие (~150÷200 °С) чугунные изложницы (пластины толщиной 30 мм) и холодный чугунный кокиль (прутки диаметром 20 мм, длиной 170 мм). Заливка лигатурного расплава в горячую изложницу обеспечивала замедленную скорость охлаждения (~10÷15 °С/с). Скорость охлаждения в холодном кокиле составляла ~60÷65 °С/с.

При получении лигатуры AlTi4 (0,5 % Mg) магний вводили с учетом угара в количестве 1 % после расплавления навески алюминия при температуре 720±10 °С. Далее процесс приготовления лигатурного сплава аналогичен вышеописанному. Заливку осуществляли в холодный кокиль (слитки диаметром 20 мм, длиной 170 мм).

Содержание титана в лигатурах определяли спектральным методом на спектроанализаторе ARL 3460 в центральной заводской лаборатории ПАО «Кузнецов» (г. Самара).

Модифицирование алюминия марки А97. Плавки проводили в стальном окрашенном тигле в печи сопротивления Graficarbo. В качестве шихты

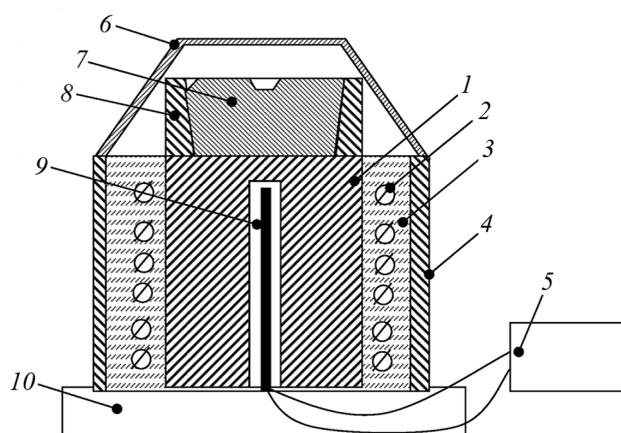


Рис. 1. Схема установки для экспресс-контроля макроструктуры алюминия

1 – стальной цилиндр с полированным основанием контакта; 2 – нагревательный элемент; 3 – теплоизоляционная засыпка; 4 – стальной кожух; 5 – видеографический регистрирующий преобразователь Ш9329А; 6 – стальная футерованная крышка; 7 – залитый образец; 8 – стальное кольцо-форма; 9 – термопара; 10 – огнеупорное основание

использовали чушковый алюминий. Масса каждой плавки составляла 0,25 кг. Лигатуры вводили в расплавы из расчета 0,01 % Ti при температуре 730 ± 10 °С, перемешивали, выдерживали в течение 10 мин и заливали образцы в установку для экспресс-анализа макроструктуры (рис. 1).

На стальной цилиндр 1 с полированным основанием контакта устанавливается стальное кольцо 8 с внутренним диаметром 60 мм, в которое заливается порция расплава. Для облегчения выемки образца 7 по внутренней высоте кольца выполнен уклон 0,5°. Для моделирования различных условий охлаждения по внешней образующей стального цилиндра располагаются нагревательные элементы 2, размещенные в кожухе 4. Контроль за температурой нагрева цилиндра осуществляется с помощью термопары 9, подключенной к видеографическому регистратору температур 5. Для снижения теплопотерь в установке предусмотрены футерованная крышка 6 и огнеупорное основание 10. Температура основания стального цилиндра при заливке в экспериментах составляла 150 °С.

Модифицирование сплава АК9ч. В качестве шихты использовали чушковый сплав, химический состав которого соответствовал требованиям ГОСТ 1583-93. Плавки массой 0,25 кг проводили в стальном окрашенном тигле в печи сопротивления Graficarbo. Модифицирование осуществляли при температуре расплавов 720–740 °С. Лигатуры вводили в расплавы из расчета 0,01 % Ti, после че-

го расплавы выдерживали 10 мин, затем проводили обработку покровно-рафинирующим флюсом производства НПП «Эвтектика» (Республика Беларусь, г. Минск, ТУ РБ 100196035.005-2000), снимали шлак, перемешивали и осуществляли заливку в кокиль, получая отливки в виде пластин толщиной 15 мм.

Плотность опытных образцов в твердом состоянии определяли методом гидростатического взвешивания. Электропроводность измеряли вихретоковым структуроскопом ВЭ-26НП.

Для оценки микроструктуры образцов лигатур и сплава АК9ч готовили шлифы по принятым методикам с последующим травлением насыщенным на холоде раствором КОН и 10 %-ным раствором едкого натра (NaOH). Микроструктуру сплавов исследовали на промышленном программно-аппаратном комплексе анализа изображений SIAMS 700 (компания «СИАМС», г. Екатеринбург, РФ).

Образцы из алюминия механической обработки не подвергали. После извлечения их из установки и охлаждения в проточной воде для выявления макроструктуры проводили травление поверхности контакта реактивом Таккера.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В таблице приведены химические составы лигатур и средние размеры интерметаллидов Al_3Ti . Анализ полученных результатов показывает, что концентрации элементов-модификаторов (Ti и Mg) в целом соответствовали расчетам. На рис. 2 представлены характерные изображения микроструктур опытных лигатур в виде пластины (Пл) и прутков (Пр), в том числе модифицированных добавкой магния (ПрMg).

Анализ микроструктур показал, что при затвердевании в изложнице в структуре лигатуры Пл формируются неоднородные крупные интерметаллиды Al_3Ti игольчатой морфологии. Затвердевание с повышенной скоростью охлаждения (обр. Пр) обуславливает формирование однородных мелкоигольчатых интерметаллидов, а дополнительное легирование магнием вызывает более существенное измельчение зародышевых фаз в лигатуре ПрMg. Магний является поверхностно-активным элементом, и его модифицирующее воздействие на интерметаллиды Al_3Ti происходит по лимитационному механизму [21].

Лигатуры, затвердевшие с повышенными ско-

Химический состав лигатур AlTi4

Лигатура	Содержание, мас.%							Средний размер Al ₃ Ti (длина×ширина), мкм
	Ti	Mn	Mg	Zn	Si	Fe	Cu	
Пл	3,86	0,4	0,03	0,03	0,15	0,11	0,02	397×23
Пр								215×13
ПрMg		0,32	0,48	0,01	0,12	0,06	0,012	98×3

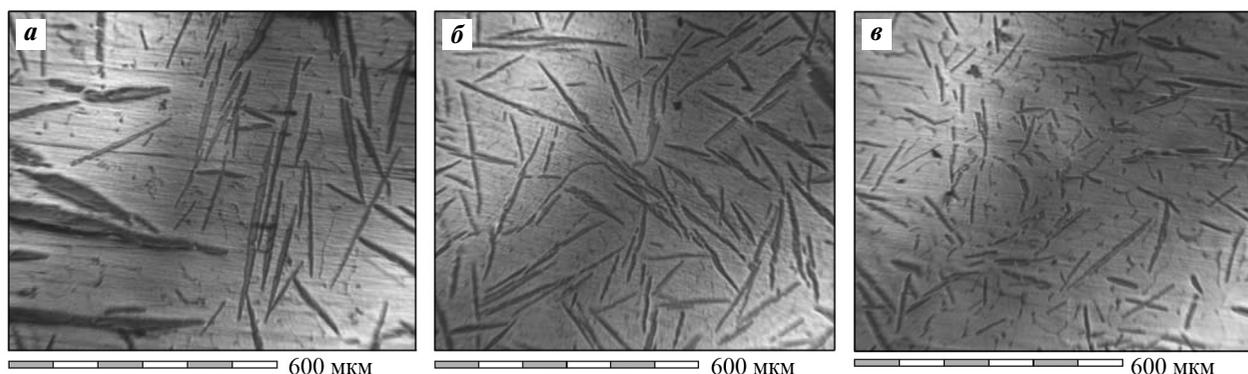


Рис. 2. Микроструктуры опытных лигатур AlTi4

а – Пл, б – Пр, в – ПрMг

ростями охлаждения (Пр и ПрMг), имеют более высокие значения плотности по сравнению с Пл, полученной кристаллизацией в изложнице (рис. 3, а). Невысокие скорости охлаждения обуславлива-

ют формирование усадочной микропористости в структуре лигатур. С измельчением интерметаллидов происходит снижение электропроводности лигатур (рис. 3, б). Это связано с увеличением числа интерметаллидов и границ, препятствующих пробегу свободных электронов в алюминиевой матрице. Введение магния в образец ПрMг вызвало дополнительное снижение электропроводности, которую в связи с этим можно использовать в качестве неразрушающего метода контроля структуры лигатур AlTi.

На рис. 4 показано влияние лигатур на макроструктуру алюминия марки А97. Максимальный модифицирующий эффект обеспечила лигатура ПрMг, характеризующаяся дисперсными мелкоигльчатыми интерметаллидами Al₃Ti.

Дисперсные интерметаллиды игльчатой морфологии при введении лигатуры в модифицируемый сплав высвобождаются из алюминиевой матрицы, дробятся под воздействием температуры и конвективных потоков, образуя дополнительные центры кристаллизации. Данное обстоятельство обуславливает увеличение модифицирующего эффекта лигатур с мелкодисперсными зародышевыми фазами.

На рис. 5 показано влияние лигатур AlTi4 на физические свойства (электропроводность и плотность) и параметры структуры сплава АК9ч

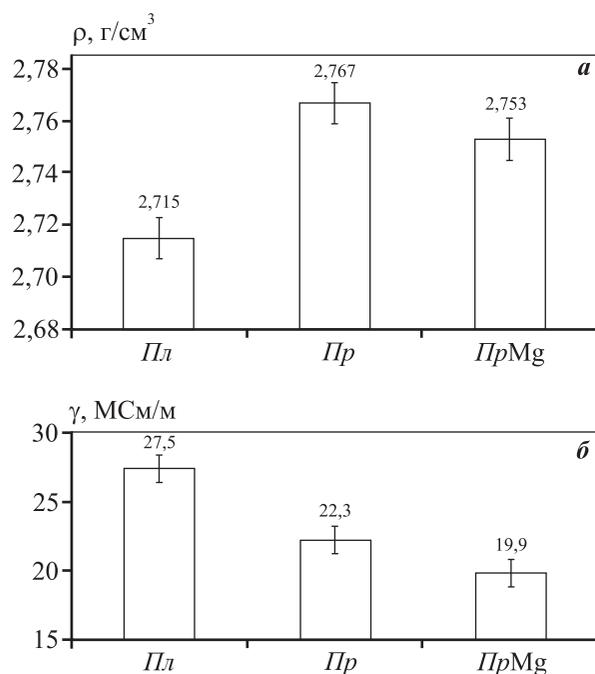


Рис. 3. Влияние способа получения лигатур AlTi4 на их физические свойства – плотность (а) и электропроводность (б)

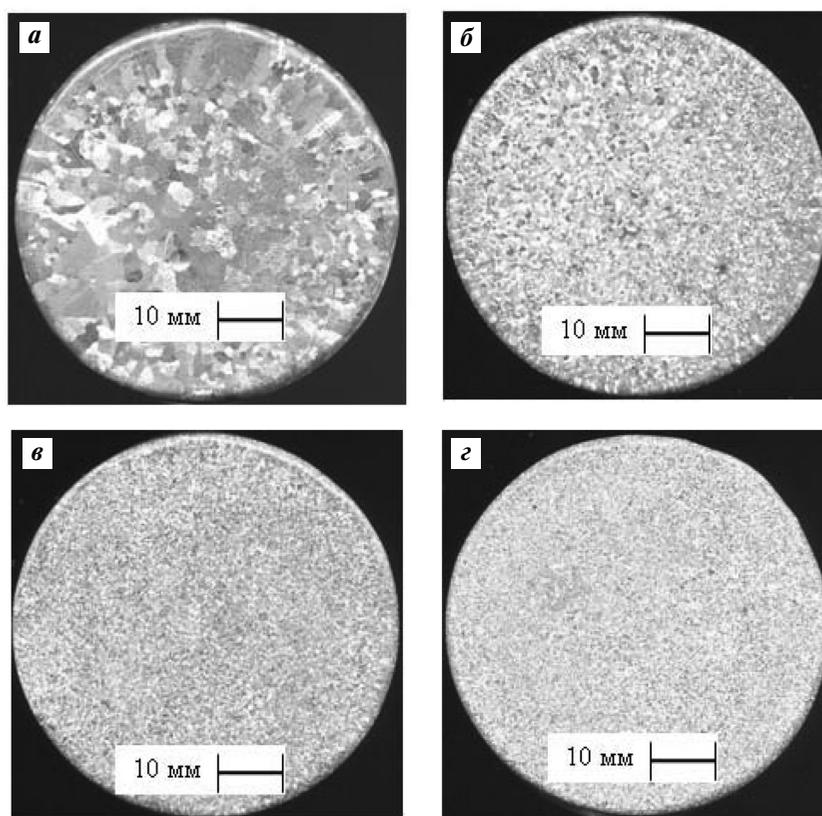


Рис. 4. Макроструктура алюминия марки А97 – исходного (а) и модифицированного лигатурами АlТi4 Пл (б), Пр (в) и ПрМg (г)

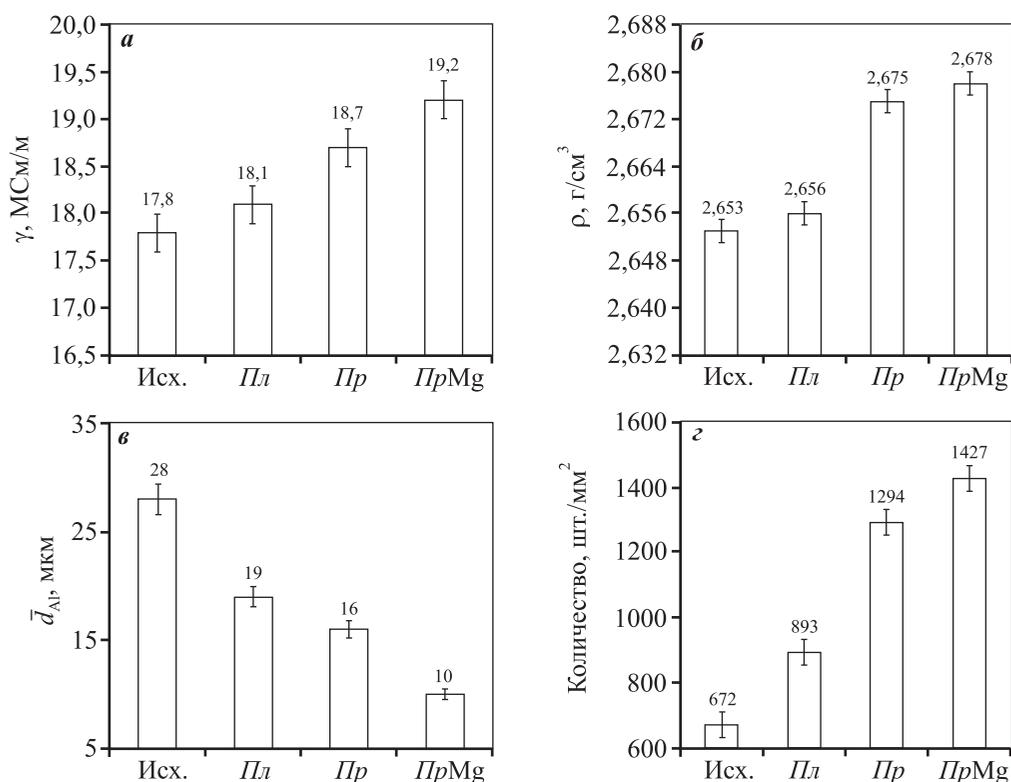


Рис. 5. Влияние вида лигатур АlТi4 на физические свойства и параметры структуры сплава АК9ч
а, б – электропроводность и плотность; в, г – средний размер и количество дендритов алюминия

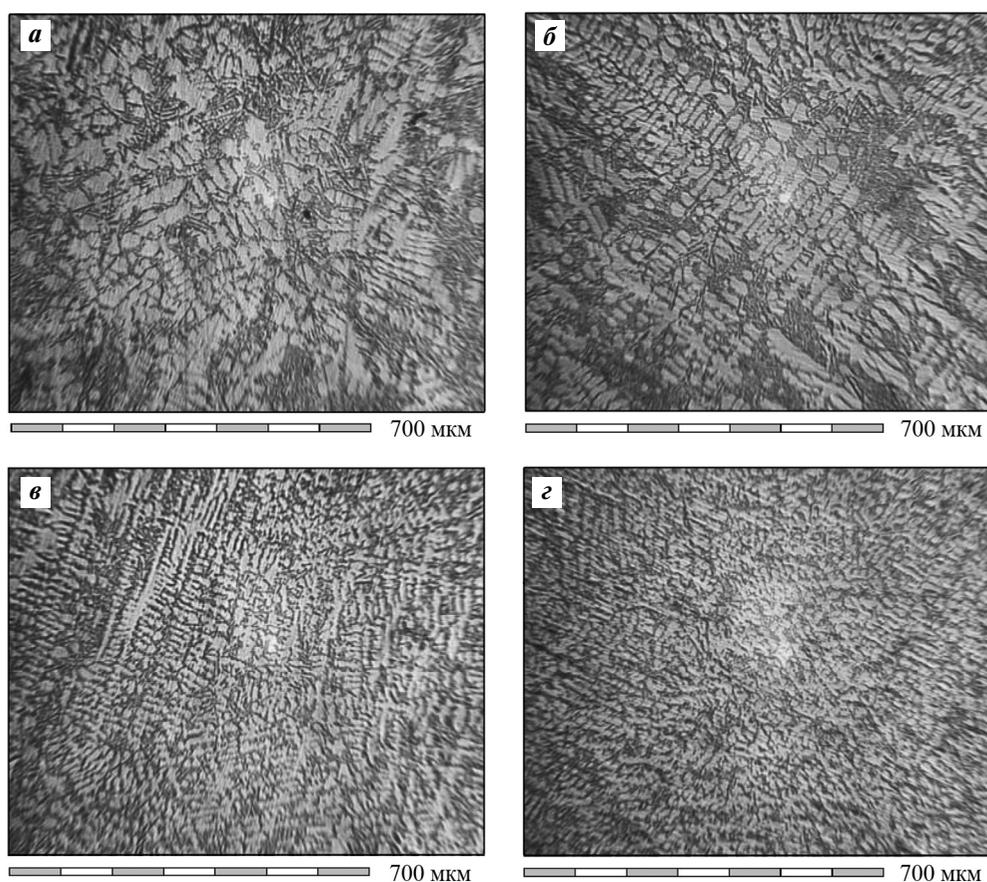


Рис. 6. Влияние лигатур AlTi4 на микроструктуру сплава АК9ч – исходного (а) и модифицированного – Pr (б), PrMg (в) и PrMg (г)

(средний размер и количество дендритов алюминия).

Модифицирование сплава АК9ч добавками лигатур Pr и PrMg, характеризующихся мелкоигльчатыми интерметаллидами Al_3Ti , способствует формированию в структуре сплава большего количества дисперсных дендритов алюминия. Такие изменения в структуре обуславливают наиболее высокие значения электропроводности и плотности сплава. Модифицирование лигатурой PrMg в рамках проведенных исследований обеспечивает максимальное измельчение дендритов, увеличение их количества, а также рост электропроводности и плотности сплава АК9ч. Электропроводность также можно использовать для неразрушающего контроля эффекта модифицирования.

На рис. 6 представлены типичные изображения микроструктур сплава АК9ч, модифицированного различными лигатурами AlTi4. Видно, что наибольшее измельчение дендритов алюминия характерно для образца, модифицированного лигатурой PrMg (рис. 6, г), по сравнению с немоди-

фицированным состоянием (рис. 6, а). Представленные микроструктуры хорошо согласуются с результатами, приведенными на рис. 5.

Заключение

Выполненные эксперименты показали, что при одинаковом содержании титана в лигатурах AlTi4 в зависимости от способа их получения формируются интерметаллиды Al_3Ti , характеризующиеся различными размерами. С повышением скорости охлаждения в 4–6 раз длина и толщина игльчатых интерметаллидов уменьшается практически в 2 раза. Дополнительное модифицирование лигатуры добавкой магния в количестве 0,5 % способствует еще большему измельчению интерметаллидов Al_3Ti .

Структура лигатур оказывает наследственное влияние на макроструктуру алюминия марки А97 и микроструктуру сплава АК9ч при одинаковой добавке титана (0,01 %) в указанные объекты исследований.

Максимальным модифицирующим эффектом характеризуется лигатура *PrMg* (модифицированная магнием).

Экспрессная оценка структуры лигатур и их модифицирующего эффекта может осуществляться с помощью замеров электропроводности.

Работа выполнена при финансовой поддержке из средств Министерства образования и науки РФ, выделяемых на программу развития СамГТУ в качестве опорного вуза.

Литература/References

1. Sigworth G.K., Kuhn T.A. Grain refinement of aluminum casting alloys. *Inter. J. Metalcast.* 2007. Vol. 1. No. 1. P. 31–40.
2. Lakhwinder S., Geetesh G., Rupinderpreet S. Review of the latest developments in grain refinement. *Inter. J. Modern Eng. Res.* 2012. Vol. 2. No. 4. P. 2724–2727.
3. Easton M.A., Qian M., Prasad A., StJohn D.H. Recent advances in grain refinement of light metals and alloys. *Current Opinion in Solid State and Mater. Sci.* 2016. No. 20. P. 13–24.
4. Lin S., Aliravci C., Pekguleryuz M.O. Hot-tear susceptibility of aluminum wrought alloys and the effect of grain refining. *Metal. Mater. Trans. A.* 2007. Vol. 38. No. 5. P. 1056–1068.
5. Shimin Li, Kumar S., Diran A. Role of grain refinement in the hot tearing of cast Al–Cu alloy. *Metal. Mater. Trans. B.* 2013. Vol. 44. No. 3. P. 614–623.
6. Mil'man Yu.V., Neikov O.D., Sirko A.I., Danilenko N.I., Samelyuk A.V., Zakharova N.P., Sharovskii A.I., Ivashchenko R.K., Goncharuk V.A., Chaikina N.G. Structure and properties of Al–Mg alloys depending on scandium and zirconium additions and production methods. *Powder Metallurgy and Metal Ceram.* 2010. Vol. 49. No. 7–8. P. 430–437.
7. Wang Xu, Chen Guoqin, Li Bing, Wu Lianmei, Jiang Daming. Effects of Sc, Zr and Ti on the microstructure and properties of Al alloys with high Mg content. *Rare Metals.* 2010. Vol. 29. No. 1. P. 66–71.
8. Shi'ang Zhou, Zhen Zhang, Ming Li, Dejiang Pan, Hailin Su, Xiaodong Du, Ping Li, Yucheng Wu. Effect of Sc on microstructure and mechanical properties of as-cast Al–Mg alloys. *Mater. Design.* 2016. Vol. 90. P. 1077–1084.
9. Kaiser M.S., Datta S., Roychowdhury A., Banerjee M.K. Effect of scandium on the microstructure and ageing behaviour of cast Al–6Mg alloy. *Mater. Characteriz.* 2008. Vol. 59. No. 11. P. 1661–1666.
10. Kaiser M.S., Datta S., Bandyopadhyay P.P., Guha A., Roychowdhury A., Banerjee M.K. Effect of grain refinement through minor additions of scandium and zirconium on the machinability of Al–Mg alloys. *J. Inst. Eng. (India): Ser. D.* 2013. Vol. 94. No. 1. P. 17–24.
11. Sigworth G.K. The modification of Al–Si casting alloys: Important practical and theoretical aspects. *Inter. J. Metalcast.* 2008. Vol. 2. No. 2. P. 19–40.
12. Rathod N.R., Manghani J.V. Effect of modifier and grain refiner on cast Al–7Si aluminum alloy: A review. *Inter. J. Emerging Trends in Engineering and Development.* 2012. Vol. 5. No. 2. P. 574–581.
13. Fang Q., Granger D. Porosity formation in modified and unmodified A356 alloy castings. *AFS Trans.* 1989. No. 97. P. 989–1000.
14. Zhang J., Chen H., Yu H., Jin Y. Study on dual modification of Al–17%Si alloys by structural heredity. *Metals.* 2015. No. 5. P. 1112–1126.
15. Ramachandran T.R., Sharma P.K., Balasubramanian K. Grain refinement of light alloys. In: *68-th World Foundry Congress (India, Chennai, 2008)*. P. 189–193.
16. Xu C.X.; Zhang J.S. Structural heredity of AlTiC master alloys. *Mater. Sci. Technol.* 2001. No. 9. P. 166–168.
17. Zhao J., Wang T., Chen J., Fu L., He J. Effect of cooling rate on morphology of TiAl₃ particles in Al–4Ti master alloy. *Materials.* 2017. Vol. 10. No. 3. P. 238.
18. Ding W., Xia T., Zhao W. Performance comparison of Al–Ti master alloys with different microstructures in grain refinement of commercial purity aluminum. *Materials: Structure Analysis and Characterization.* 2014. Vol. 7. No. 5. P. 3663–3676.
19. Zhao J., He J., Tang Qi, Wang T., Chen J. Grain refinement efficiency in commercial-purity aluminum influenced by the addition of Al–4Ti master alloys with varying TiAl₃ particles. *Materials: Physical Metallurgy of High Performance Alloys* 2016. Vol. 9. No. 11. P. 1–10.
20. Lipiński T. Structure and mechanical properties of Al–12%Si alloy with fast cooling Al–12%Si. *Arch. Foundr. Eng.* 2008. Vol. 8. No. 3. P. 51–54.
21. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005; Nikitin V.I., Nikitin K.V. Nasledstvennost' v litih splavah [Heredity in cast alloys]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005.
22. Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю. Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности. М.: Радунница, 2015; Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I. Yu. Upravlenie kachestvom litykh izdelii iz alyuminiyevykh splavov na osnove yavleniya strukturnoi nasledstvennosti [Quality control of cast products from aluminium alloys based on the phenomenon of structural heredity]. Moscow: Radynitsa, 2015.