

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ПЛОТНОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Mg

© 2017 г. **К.В. Никитин, В.И. Никитин, Д.С. Кривопапов, В.А. Глушечков, Д.Г. Черников**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева (СНИУ)

Статья поступила в редакцию 28.11.16 г., доработана 05.02.17 г., подписана в печать 17.02.17 г.

Выполнено сравнительное исследование по влиянию модифицирующих лигатур AlZr4, AlZr10 и AlSc2, а также магнитно-импульсной обработки (МИО) на плотность (в жидком и твердом состояниях), электропроводность (в твердом состоянии) и макроструктуру сплавов AMg5 и AMg6. Лигатурные расплавы заливались в специальные устройства, обеспечивающие скорости охлаждения при кристаллизации $\sim 10^2$, $\sim 10^3$ и $\sim 10^6$ °C/с. Лигатуры вводились в расплавы из расчета 0,01% по элементу-модификатору. Показано, что модифицирующая обработка расплавов добавками зародышеобразующих лигатур способствует повышению плотности сплавов в жидком и твердом состояниях. Электропроводность сплавов с добавками лигатур AlZr4 и AlZr10 снижается. Введение лигатуры AlSc2 вызывает повышение электропроводности сплавов AMg5 и AMg6. Данный эффект установлен впервые и требует дополнительных исследований. Установлено, что по сравнению с лигатурами AlZr4 и AlZr10 наибольшее влияние на физические свойства сплавов оказывает лигатура AlSc2, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе. Также она обеспечивает максимальное измельчение макроструктуры. Магнитно-импульсная обработка расплавов по осевой схеме воздействия, как и введение модифицирующих лигатур, способствуют увеличению плотности сплавов в жидком и твердом состояниях. Электропроводность после МИО повышается, как и после добавки в расплавы лигатуры AlSc2. Измельчение макроструктуры сплавов при МИО сопоставимо с модифицированием лигатурой AlZr4. На основании сравнительных исследований сделан вывод о том, что МИО можно отнести к физическим способам модифицирования. Методики определения плотности и электропроводности предлагается использовать для экспрессной оценки модифицирующей эффективности исследованных воздействий.

Ключевые слова: сплавы системы Al–Mg, слитки, плотность, электропроводность, модифицирующие лигатуры, магнитно-импульсная обработка, макроструктура.

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.

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

Кривопапов Д.С. – канд. техн. наук, ассистент той же кафедры. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Глушечков В.А. – канд. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением (ОМД), науч. руководитель лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» (НИЛ-41) Самарского национального исследовательского университета (СНИУ) (443086, г. Самара, Московское ш., 34). E-mail: imp@ssau.ru.

Черников Д.Г. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИЛ-41, ассистент кафедры ОМД СНИУ. E-mail: omd@ssau.ru.

Для цитирования: Никитин К.В., Никитин В.И., Кривопапов Д.С., Глушечков В.А., Черников Д.Г. Влияние различных видов обработки на структуру, плотность и электропроводность деформируемых сплавов системы Al–Mg // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 4. С. 46–52. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-46-52.

Nikitin K.V., Nikitin V.I., Krivopalov D.S., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G.

Influence of various treatment types on the structure, density, and electrical conductivity of Al–Mg system wrought alloys

A comparative study was carried out to determine the effect of AlZr4, AlZr10 and AlSc2 modifying master-alloys and magnetic-pulse treatment (MPT) on the density (in liquid and solid state), electrical conductivity (in solid state) and macrostructure of AMg5 and AMg6 alloys. Molten master alloys were poured into special devices to ensure a cooling rate of $\sim 10^2$, $\sim 10^3$ and $\sim 10^6$ °C/s during crystallization. Master alloys were introduced into the melts at the rate of 0.01% per modifier element. It is shown that melt modification with nucleating additives contributes to higher alloy density in liquid and solid states. The electrical conductivity of the alloys with AlZr4 and AlZr10 master alloys added is lower. The AlSc2 master alloy introduction causes an increase in the electrical conductivity of

AMg5 and AMg6 alloys. This effect is observed for the first time and requires additional research. It is found that the AlSc2 master alloy obtained by crystallization in a water-cooled roller mold has the greatest influence on the physical properties of alloys in comparison with AlZr4 and AlZr10 master alloys. It also provides maximum macrograin refinement. Magnetic-pulse treatment (MPT) of melts following the axial scheme of impact contributes to higher density of alloys in liquid and solid states similar to the introduction of modifying master alloys. Electrical conductivity increases after MPT as with the AlSc2 master alloy added to melts. Alloy macrograin refinement at magnetic-pulse treatment is comparable with the addition of the AlZr4 modifying master alloy. The comparative studies allow for the conclusion that magnetic-pulse treatment can be attributed to physical modification methods. The methods of density and electrical conductivity determination can be used for express evaluation of the studied effects for their modifying effectiveness.

Keywords: Al-Mg system alloys, ingots, density, electrical conductivity, modifying master alloys, magnetic-pulse treatment, macrostructure.

Nikitin K.V. — Dr. Sci. (Eng.), 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.

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

Krivopalov D.S. — Cand. Sci. (Eng.), Assistant, Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Glushchenkov V.A. — Cand. Sci. (Eng.), Prof., Department of metal forming, scientific, Director of the Laboratory «Advanced technological processes of plastic deformation» (SRL-41), Samara National Research University (SNRU) (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: imp@ssau.ru.

Chernikov D.G. — Cand. Sci. (Eng.), Senior researcher, SRL-41, Assistant, Department of metal forming, SNRU. E-mail: omd@ssau.ru.

Citation: Nikitin K.V., Nikitin V.I., Krivopalov D.S., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G. Vliyaniye razlichnykh vidov obrabotki na strukturu, plotnost' i elektroprovodnost' deformiruemykh splavov sistemy Al-Mg. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 4. P. 46–52. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-46-52.

Введение

Магний широко применяется в качестве легирующего элемента в алюминиевых сплавах [1]. Деформируемые сплавы на основе алюминия, легированные магнием (магналий), используются для получения деформированных полуфабрикатов различной конфигурации — листов, прутков, профилей и т.д.

С целью обеспечения требуемого уровня механических и эксплуатационных свойств используются различные способы модифицирования структуры магналий. Наибольшее распространение в качестве модификаторов получили добавки зародышеобразующих лигатур с цирконием, титаном и скандием [2–5]. В работе [6] отмечается, что модифицирование магналий небольшими добавками скандия и/или циркония способствует не только измельчению структуры и повышению механических свойств, но и улучшению деформационной обработки и обработки резанием. Проводятся сравнительные исследования по влиянию добавок ниобия на структуру и свойства сплавов системы Al-Mg [7]. Однако при этом оценивается только химическое влияние добавок зародышеобразующих элементов и не уделяется внимание влиянию структуры модифицирующих лигатур.

В последние годы интенсифицировались исследования по влиянию различных видов физических воздействий на сплавы системы Al-Mg в жидком [8, 9] и твердом [10] состояниях. Отмечается, что жидкофазная обработка ультразвуком металлических расплавов способствует их комплексной обработке: дегазации, рафинированию и модифицированию [9, 11]. Следует отметить, что наибольшее количество исследований посвящено физическим способам обработки расплавов системы Al-Si [12–15].

Известно, что структура литых слитков из алюминиевых деформируемых сплавов оказывает существенное влияние на процессы деформации и свойства деформированных полуфабрикатов [16]. В связи с этим научный и практический интерес представляют сравнительные исследования эффективности модификаторов зародышевого типа действия и физических способов обработки расплавов системы Al-Mg.

Материалы и методика экспериментов

В Центре литейных технологий (ЦЛТ) СамГТУ исследовали влияние модифицирования лигатурами AlZr, AlSc, полученными с различными ско-

Таблица 1
Способы получения модифицирующих лигатур

Состав лигатуры	Способ кристаллизации	Вид лигатуры	$v_{\text{охл}}$, °C/с	Ср. размер алюминидов, мкм
AlZr4	Чугунная изложница, в поле центробежных сил	Кольцевая заготовка с толщиной стенки 4 мм	$\sim 10^2$	25–30
AlZr10	Водоохлаждаемый медный барабан	Лента толщиной 0,1–0,3 мм	$\sim 10^6$	1,5–2,0
AlSc2	Водоохлаждаемый валковый кристаллизатор	Лента толщиной 1,5–2,0 мм	$\sim 10^3$	20–25

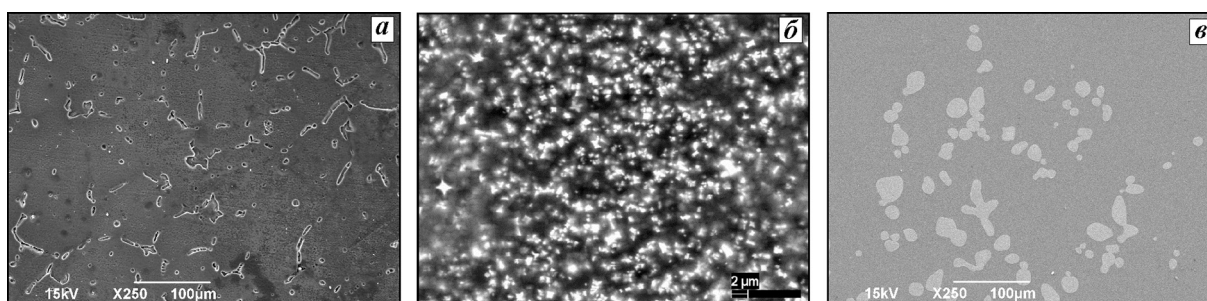


Рис. 1. Микроструктура лигатур AlZr4 (а), AlZr10 (б) и AlSc2 (в)

ростями охлаждения, а также магнитно-импульсной обработки на свойства сплавов АМг5 и АМг6 (ГОСТ 4784-97).

Для приготовления сплавов в качестве шихты использовали отходы электротехнического алюминия марки А7, чушковый магний марки Мг90, чушковые лигатуры AlMn10 (ООО «ИнтермиксМет», г. Химки, Московская обл.) и AlTi10 (LSM, Великобритания). Для защиты зеркала расплава от окисления применяли карналлитовый флюс (35%KCl–44%MgCl₂, ТУ 1714-470-05785388-2011). Модифицирующие лигатуры AlZr4, AlZr10 и AlSc2 получали переплавом чушковых лигатур в ЦЛТ, обеспечивая различные скорости охлаждения при кристаллизации (табл. 1). Химический состав лигатур AlSc2(В), AlZr10(В) соответствовал ГОСТ Р 53777-2010, а AlZr4 по содержанию примесей отвечал лигатуре AlZr5. Методика определения скорости охлаждения ($v_{\text{охл}}$) подробно описана в работе [16].

На рис. 1 представлены характерные микроструктуры лигатур. Видно, что минимальными размерами алюминидов циркония характеризуется образец AlZr10, полученный кристаллизацией на водоохлаждаемом медном барабане с $v_{\text{охл}} \sim 10^6$ °C/с. Лигатуры вводили в расплав из расчета введения элемента-модификатора в количестве 0,01 мас. %.

Анализ макроструктуры выполняли с применением программно-аппаратного комплекса

SIAMS-700. Образцы перед исследованием подвергали шлифованию и полированию, а также травлению реактивом Таккера.

Магнитно-импульсную обработку (МИО) сплава АМг6 проводили в печи сопротивления с графитовым тиглем. Ее осуществляли по осевой схеме воздействия на опытной магнитно-импульсной установке МИУ-5, разработанной и изготовленной специалистами НИЛ-41 СНИУ [17, 18]. Параметры обработки следующие:

- масса расплава 4 кг;
- температура расплава 720 ± 10 °C;
- мощность импульса 1 кДж;
- количество импульсов 10 шт.

После МИО получали литьем опытные слитки размерами $150 \times 50 \times 6$ мм путем погружения кокиля в расплав при температуре 720 ± 10 °C [19]. Для реализации данного способа был изготовлен полуавтоматический манипулятор специальной конструкции (рис. 2). Он предназначен для получения литых изделий из сплавов цветных металлов и обеспечивает поворот горизонтальной траверсы относительно вертикальной оси, погружение литейной формы в расплав, выдержку в течение заданного времени, подъем формы с отливкой и вывод ее из рабочего пространства печи. При литье погружением предусмотрены дополнительные операции: раскрытие формы, извлечение слитка и закрытие кокиля. Температура кокиля перед погружением

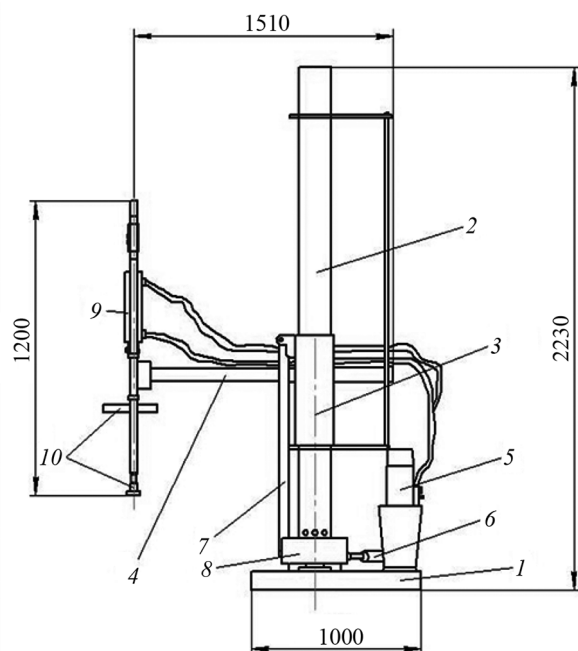


Рис. 2. Схема манипулятора

1 – основание; 2 – поворотная колонна; 3 – подъемная колонна; 4 – поворотная траверса; 5 – гидростанция; 6 – горизонтальный гидроцилиндр; 7 – вертикальный гидроцилиндр; 8 – распределительная коробка; 9 – гидроцилиндр для раскрытия кокиля; 10 – узел крепления кокиля

поддерживалась в интервале 250–300 °С и контролировалась с помощью бесконтактного инфракрасного пирометра модели Greenlee TG-600.

Плотность в жидком состоянии определяли по усовершенствованному экспресс-методу [20], а в твердом – путем гидростатического взвешивания.

Электропроводность в твердом состоянии измеряли с помощью вихретокового структуроскопа ВЭ-26НП. Указанные свойства являются наиболее структурно-чувствительными и позволяют экспрессно оценивать влияние воздействий, оказываемых на сплавы [16, 20].

Таблица 2

Химические составы исследуемых сплавов

Марка сплава	Лигатура	Содержание, мас.%								
		Mg	Mn	Ti	Zr	Sc	Si	Fe	Cu	Zn
АМг5	–				–	–				
	AlZr4	5,2	0,4	0,03	0,011	–	0,03	0,03	0,02	0,01
	AlZr10				0,011	–				
	AlSc2				–	0,01				
АМг6	–				–	–				
	AlZr4	6,3	0,7	0,03	0,01	–	0,03	0,03	0,02	0,01
	AlZr10				0,01	–				
	AlSc2					0,01				

Результаты экспериментов и их обсуждение

В табл. 2 приведены химические составы опытных сплавов до и после введения в них модифицирующих лигатур. Анализ представленных данных показывает, что в целом увеличение концентрации элементов-модификаторов соответствовало расчету.

На рис. 3 и 4 показано влияние способов модифицирования на физические свойства сплавов АМг5 и АМг6. Образец АМг5 без добавок характеризуется повышенной плотностью в жидком и твердом состояниях по сравнению со сплавом АМг6, что обусловлено пониженным содержанием в нем магния. После введения лигатур плотность всех образцов повышается, при этом указанное различие в ее значениях сохраняется. Однако лигатура AlZr10 оказывает более существенное влияние на плотность сплавов по сравнению с AlZr4 при одинаковом количестве введенного циркония. Это, вероятно, связано с тем, что лигатура AlZr10 кристаллизовалась при скоростях охлаждения $\sim 10^6$ °С/с (AlZr4 – при $v_{\text{охл}} = 10^2$ °С/с), которые обусловили формирование в ее структуре более дисперсных алюминидов циркония, характеризующихся высокой зародышеобразующей способностью. Наибольшее увеличение плотности исследуемых образцов установлено при модифицировании лигатурой AlSc2, которая кристаллизовалась с $v_{\text{охл}} \sim 10^3$ °С/с.

Магнитно-импульсная обработка оказывает такое же влияние на плотность сплавов, что и модифицирование добавками лигатур. Это свидетельствует о том, что в результате МИО происходит изменение строения расплава, которое далее наследуется твердым состоянием.

Сплав АМг5, имеющий в составе меньшее количество легирующих элементов, характеризуется

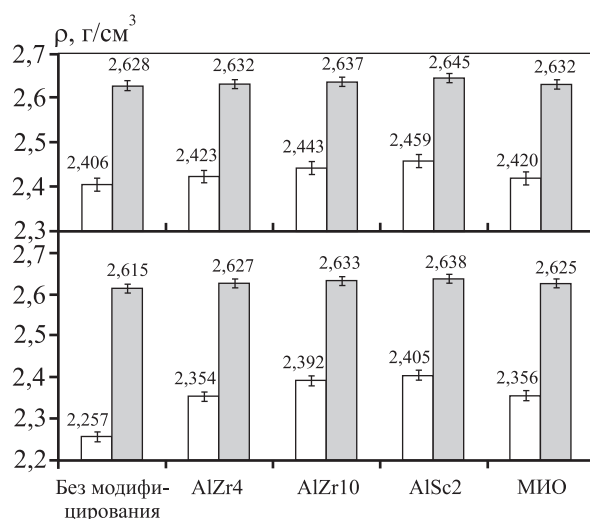


Рис. 3. Влияние способа модифицирования на плотность сплавов АМг5 (а) и АМг6 (б) в жидком (светлый фон) и твердом (темный) состояниях

повышенной электропроводностью по сравнению с АМг6 (см. рис. 4). Добавки циркониевых лигатур несколько снижают электропроводность исследуемых магналиев. Это, вероятно, обусловлено увеличением доли границ микрозерен и β-фазы (Al_3Mg_2), которые препятствуют движению свободных электронов. Модифицирование магналиев лигатурой AlSc2 способствовало повышению электропроводности (γ). Данный эффект установлен впервые и требует дополнительных исследований.

На рис. 5 и 6 представлены результаты металлографического анализа макроструктуры широких граней опытных слитков в литом состоянии.

Анализ макроструктуры показывает следующее. Наибольшее измельчение макрозерна сплавов вызывает добавка лигатуры AlSc2. Это может быть объяснено с позиции электронной теории [21], согласно которой эффективность модифицирования зависит от акцептирующей способности d -оболочки переходных металлов. При добавлении к алюминию и сплавам на его основе ряда переходных металлов, обладающих наибольшей дефектностью электронного d -уровня их строения, достигается максимальный эффект модифицирования. Одним из критериев, характеризующих модифицирующую способность переходных металлов, является так называемая акцепторная способность d -оболочки:

$$\xi = 1/(Nn),$$

где N — главное квантовое число недостроенной d -оболочки; n — число электронов на d -оболочке.

В электронной структуре скандий имеет наи-

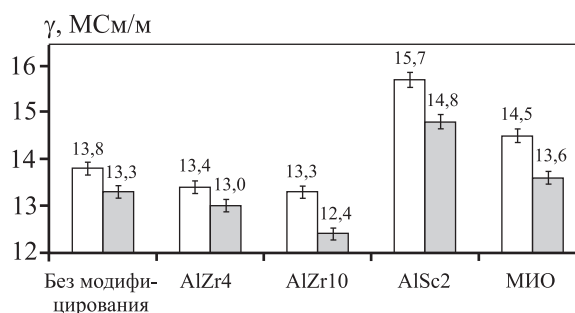


Рис. 4. Влияние способа модифицирования на электропроводность сплавов АМг5 (светлый фон) и АМг6 (темный) в твердом состоянии

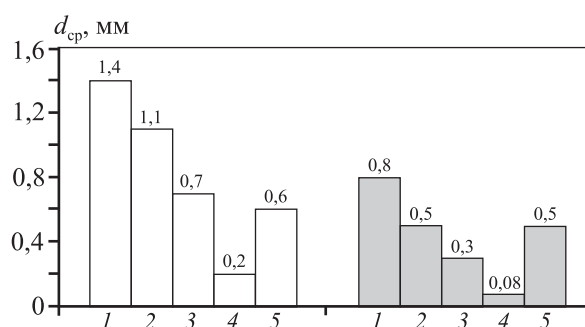


Рис. 5. Влияние модифицирования на средний размер макрозерна сплавов АМг5 (светлый фон) и АМг6 (темный)

1 — без модифицирования; 2 — добавка AlZr4; 3 — добавка AlZr10; 4 — добавка AlSc2; 5 — магнитно-импульсная обработка (МИО)

высшее значение $\xi = 0,333$, у титана оно равно 0,167, у циркония — 0,125. Сопоставление результатов, полученных с использованием лигатур AlZr4 и AlZr10, позволяет сделать заключение о том, что в данном случае решающее значение имеют параметры интерметаллидов Al_3Zr . Лигатура AlZr10, полученная со скоростью охлаждения порядка 10^6 °C/c, характеризуется размерами алюминидов циркония, практически на порядок меньшими ($d = 1,5 \div 2,0$ мкм) по сравнению с AlZr4 (25—30 мкм), которая кристаллизовалась с $v_{\text{охл}} \sim 10^2$ °C/c.

Магнитно-импульсная обработка также оказала модифицирующее влияние на макрозерно сплавов. Эффективность МИО сопоставима с модифицирующим воздействием лигатуры AlZr4. Влияние МИО на структуру и свойства алюминиевых сплавов теоретически обосновано и экспериментально доказано в работах [14—17]. Силловые факторы в виде ударных волн и интенсивных металлопоточков, возникающих в расплаве в ре-

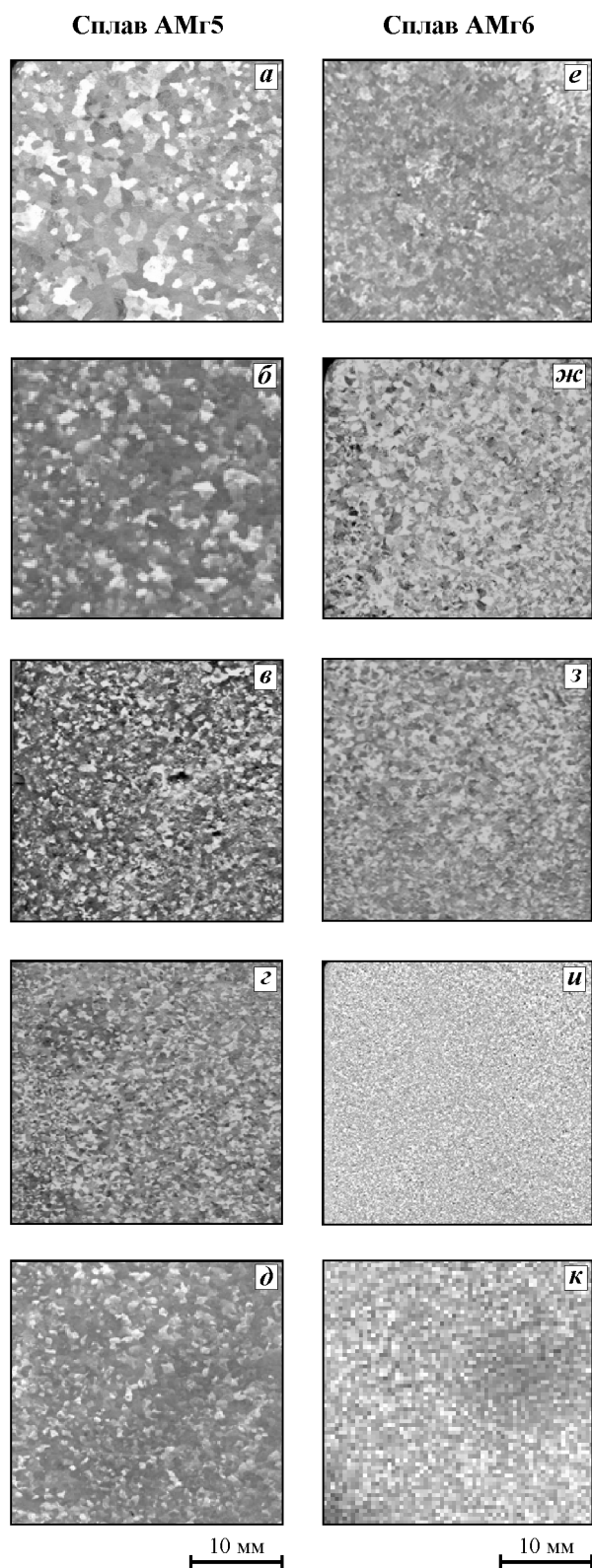


Рис. 6. Влияние модифицирования на макрозерно сплавов АМг5 (слева) и АМг6 (справа)

а, е – без модифицирования; *б, ж* – добавка AlZr4;
в, з – добавка AlZr10; *г, и* – добавка AlSc2;
д, к – магнитно-импульсная обработка

зультате магнитно-импульсной обработки, способствуют перемешиванию всего объема обрабатываемого расплава и диспергированию основных элементов его структуры.

Характер влияния различных модифицирующих воздействий на макроструктуру сплавов АМг5 и АМг6 сопоставим с особенностями изменения их физических свойств – плотности и электропроводности. Следовательно, методики определения этих показателей можно использовать для экспрессной оценки модифицирующей эффективности исследованных воздействий.

Заключение

На основании выполненных экспериментов установлено, что модифицирующие лигатуры оказывают устойчивое наследственное влияние на физические свойства (плотность в жидком и твердом состояниях, электропроводность в твердом состоянии) и макроструктуру сплавов АМг5 и АМг6. Наибольшим влиянием на физические свойства и размер макрозерна сплавов обладает лигатура AlSc2, полученная кристаллизацией в водоохлаждаемом валковом кристаллизаторе, по сравнению с AlZr4 и AlZr10. Эффективность лигатуры AlSc2 обусловлена максимальным значением критерия акцепторной способности $\xi = 0,333$.

Повышенная модифицирующая способность лигатуры AlZr10 по сравнению с AlZr4 объясняется, прежде всего, минимальными размерами интерметаллидов Al₃Zr.

Обработка расплавов магнитными импульсами вызывает увеличение плотности и электропроводности сплавов, а также измельчение макрозерна, сопоставимое с использованием лигатуры AlZr4. Модифицирующее действие МИО обусловлено давлением магнитных импульсных полей на расплавы, которые в упругой среде преобразуются в ударные волны, вызывающие интенсивные металлопоток. Наличие указанных силовых факторов вызывает изменения в строении расплавов, которые наследуются структурой литых изделий в процессе затвердевания. Следовательно, МИО можно использовать в качестве жидкофазной модифицирующей обработки сплавов на основе алюминия непосредственно в плавильной печи.

Методики определения плотности и электропроводности можно использовать для экспрессной оценки модифицирующей эффективности исследованных воздействий.

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

Литература/References

1. Mordike B.L., Ebert T. Magnesium. Properties — applications — potential. *Mater. Sci. Eng.* 2001. Vol. 302. P. 37—45.
2. 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.
3. 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.
4. 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. and Design.* 2016. Vol. 90. P. 1077—1084.
5. 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.
6. 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.
7. Hui'zhong Li, Haijun Wang, Xiaopeng Liang, Yan Wang, Hongting Liu. Effect of Sc and Nd on the microstructure and mechanical properties of Al—Mg—Mn alloy. *J. Mater. Eng. Perf.* 2012. Vol. 21. No. 1. P. 83—88.
8. Kumar S., Hari Babu N., Scamans G.M., Fan Z. Influence of intensive melt shearing on the microstructure and mechanical properties of an Al—Mg alloy with high added impurity content. *Metal. Mater. Trans. A.* 2011. Vol. 42A. P. 3141—3149.
9. Eskin G.I. Improvement of the structure and properties of ingots and worked Aluminum alloy semifinished products by melt ultrasonic treatment in a cavitation regime. *Metallurgist.* 2010. Vol. 54. No. 7-8. P. 505—513.
10. Murashkin M.Yu., Kil'mametov A.R., Valiev R.Z. Structure and mechanical properties of an aluminum alloy 1570 subjected to severe plastic deformation by high-pressure torsion. *Phys. Met. and Metallograph.* 2008. Vol. 106. No. 1. P. 90—96.
11. Hanbing Xu, Thomas T. Meek, Qingyou Han. Effects of ultrasonic field and vacuum on degassing of molten aluminum alloy. *Mater. Let.* 2007. Vol. 61. No. 4-5. P. 1246—1250.
12. Deev V.B., Selyanin I.F., Kutsenko A.I., Belov N.A., Ponomareva K.V. Promising resource saving technology for processing melts during production of cast aluminum alloys. *Metallurgist.* 2015. Vol. 58. No. 11-12. P. 1123—1127.
13. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Белов Н.А., Приходько О.Г., Пonomарева К.В. Физические модифицирующие воздействия и их влияние на кристаллизацию литейных сплавов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 3. С. 56—59; Selyanin I. F., Deev V.B., Belov N.A., Prikhodko O.G., Ponomareva K.V. Physical modifying effects and their influence on the crystallization of casting alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 4. P. 434—436.
14. Li Q.L., Xia T.D., Lan Y.F., Li P.F. Effects of melt superheat treatment on microstructure and wear behaviours of hypereutectic Al—20Si alloy. *Mater. Sci. Technol.* 2014. Vol. 30. No. 7. P. 835—841.
15. Jian X., Xu H., Meek T. T., Han Q. Effect of power ultrasound on solidification of aluminium A356 alloy. *Mater. Let.* 2005. No. 59. P. 190—193.
16. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu. Upravlenie kachestvom litykh izdelii iz alyuminiyevykh spлавov na osnove yavleniya strukturnoi nasledstvennosti [Quality control of cast products from aluminium alloys based on the phenomenon of structural heredity]. Moscow: Radynitsa, 2015.
17. Никитин К.В., Амосов Е.А., Никитин В.И., Глушченков В.А., Черников Д.Г. Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 5. С. 11—19; Nikitin K.V., Amosov E.A., Nikitin V.I., Glushchenkov V.A., Chernikov D.G. Theoretical and experimental substantiation of treatment of aluminum based melts by pulsed magnetic fields. *Russ. J. Non Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 6. P. 599—605.
18. Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Глушченков В.А., Черников Д.Г. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силуминов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 34—42; Nikitin K.V., Nikitin V.I., Glushchenkov V.A., Timoshkin I.Yu., Chernikov D.G. Melt treatment by pulsed magnetic fields aimed at controlling the structure and properties of industrial silumins. *Russ. J. Non Ferr. Met.* 2016. Vol. 57. No. 3. P. 207—210.
19. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Chernikov D.G. Application of structural inheritance phenomenon at producing the Al—Mg system alloys. *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 684. P. 269—272.
20. Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Кривопапов Д.С., Черников Д.Г. Наследственное влияние структуры шихтовых металлов на плотность алюминиевых расплавов системы Al—Si // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2014. No. 6. С. 22—27; Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Krivopalov D.S., Chernikov D.G. Hereditary influence of the structure of charge materials on the density of aluminum alloys of the Al—Si system. *Russ. J. Non Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 1. P. 20—25.
21. Lamikhov L.K., Samsonov G.V. O modifitsirovani alyuminiya i splava AL7 perekhodnymi metallami [About the modification of aluminium and alloy AL7 transition metals]. *Tsvet. metally.* 1964. No. 1. P. 24.