

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Si

© 2016 г. **И.Ю. Тимошкин, К.В. Никитин, В.И. Никитин, В.Б. Деев**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 21.09.15 г., подписана в печать 06.10.15 г.

Выполнены исследования по влиянию обработки расплавов электромагнитными акустическими полями на структуру и свойства двойных сплавов Al–12%Si и Al–20%Si. В процессе экспериментов варьировали частоту электромагнитного поля, наводимого в петле-антенне: 500, 1000 и 2000 кГц. Обработку расплавов проводили после их дегазации и рафинирования. Установлено, что данный способ обработки расплавов обуславливает сокращение общего времени приготовления сплавов в среднем на 12 %. Кратковременная обработка расплавов электромагнитными акустическими полями способствует измельчению основных фазовых составляющих сплавов и повышению их механических свойств. При обработке эвтектического сплава Al–12%Si с частотой 500 кГц наблюдалось измельчение дендритов α -Al (с 30 до 22 мкм) и кристаллов эвтектического Si (с 13 до 10 мкм). При обработке заэвтектического сплава Al–20%Si с частотой 1000 кГц кристаллы эвтектического Si уменьшались с 8 до 5 мкм, первичного Si – с 90 до 62 мкм. При указанных режимах обработки эвтектического сплава Al–12%Si предел прочности при растяжении увеличился на 13 %, относительное удлинение – на 17 %; у заэвтектического сплава Al–20%Si те же показатели повысились на 9 и 65 % соответственно. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что выбор параметров обработки расплавов системы Al–Si электромагнитными акустическими полями должен обуславливаться содержанием кремния в сплаве. С увеличением концентрации кремния необходимо обрабатывать расплав волнами с большей частотой колебания. Указанный способ обработки позволяет получать модифицированную мелкокристаллическую структуру сплавов и, как следствие, вызывает повышение их механических свойств. Он может быть успешно использован при получении мелкокристаллических лигатур и в производстве сплавов системы Al–Si. Для определения оптимальных параметров обработки в зависимости от структуры исходной шихты и природы сплавов требуются дополнительные исследования.

Ключевые слова: электромагнитные акустические поля, сплавы системы Al–Si, твердожидкий сплав, диспергирование кремния, микроструктура, механические свойства.

Тимошкин И.Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедры литейных и высокоэффективных технологий СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). Тел.: +7 (846) 333-61-01. Факс: +7 (846) 242-22-68. E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Никитин К.В. – докт. техн. наук, доцент, гл. науч. сотр. этой же кафедры. Тел.: +7 (846) 333-61-01. Факс: +7 (846) 242-22-68. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Никитин В.И. – докт. техн. наук, проф., зав. этой кафедрой. Тел./факс: +7 (846) 242-22-68. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Деев В.Б. – докт. техн. наук, профессор кафедры литейных технологий и художественной обработки металлов НИТУ «МИСиС», гл. науч. сотр. Инжинирингового центра «Литейные технологии и материалы» НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Для цитирования: Тимошкин И.Ю., Никитин К.В., Никитин В.И., Деев В.Б. Влияние обработки расплавов электромагнитными акустическими полями на структуру и свойства сплавов системы Al–Si // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 3. С. 28–33. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-28-33.

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

Influence of melt processing with electromagnetic acoustic fields on the structure and properties of Al–Si system alloys

The research on the influence of melt processing with electromagnetic acoustic fields on the structure and properties of binary alloys Al–12%Si and Al–20%Si was conducted. The frequency of electromagnetic field induced in the loop antenna was changed between 500, 1000 and 2000 kHz during the experiments. Melts were processed after their degassing and refining. It was determined that this method of melt processing reduces the average total time of alloy production by 12 %. Short-term treatment of melts with electromagnetic acoustic fields helps to grind main phase alloy components and to improve their mechanical properties. Grinding of α -Al dendrites (from 30 to 22 μ m) and eutectic Si crystals (from 13 to 10 μ m) was observed while processing Al–12%Si eutectic alloy with a frequency of 500 kHz. At the same time, Al–20%Si hypereutectic alloy treatment with a frequency of 1000 kHz led to reduction of

eutectic Si crystals from 8 to 5 μm , and of primary Si crystals – from 90 to 62 μm . Under specified processing conditions the tensile strength of Al–12%Si eutectic alloy increased by 13 %, and elongation – by 17 %, the same mechanical properties of Al–20%Si hypereutectic alloy increased by 9 and 65 % respectively. Based on the studies performed it was concluded that the choice of parameters for Al–Si melt processing with electromagnetic acoustic fields depended on the silicon content in the alloy. The increase in silica concentration needs treatment with the waves of higher vibration frequency. This processing technique allows modifying the fine crystalline structure of alloys and as a result causes an improvement of their mechanical properties. It can be successfully used for the production of fine-grained ligatures and Al–Si system alloys. However, further research is required to determine optimal processing parameters depending on the structure of the original charge and the nature of the alloys.

Keywords: electromagnetic acoustic fields, Al–Si system alloys, solid-liquid alloy, silica dispersion, microstructure, mechanical properties.

Timoshkin I.Yu. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of foundry and high-efficiency technologies (FHET), Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244). E-mail: ivan-mns@mail.ru.

Nikitin K.V. – Dr. Sci. (Tech.), associate prof, chief researcher, Department of FHET, SSTU. E-mail: kvn-6411@mail.ru.

Nikitin V.I. – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of the Department of FHET, SSTU. E-mail: tlp@samgtu.ru.

Deev V.B. – Dr. Sci. (Tech.), professor of the Department of foundry technologies and material art working MISIS, chief researcher of the Engineering Centre «Foundry technologies and materials», National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Citation: *Timoshkin I.Yu., Nikitin K.V., Nikitin V.I., Deev V.B.* Vliyanie obrabotki rasplavov elektromagnitnymi akusticheskimi polyami na strukturu i svoystva splavov sistemy Al–Si. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 3. P. 28–33.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-28-33.

Введение

Двойные сплавы Al–Si находят применение в качестве лигатур для приготовления многокомпонентных литейных силуминов, некоторых деформируемых алюминиевых сплавов (АК4, АК-1, АК8 и др.) и припоев (СИЛ0, АЛ2, В65, А34 и пр.).

Литейные силумины используются при получении отливок разными способами литья для различных назначений (в машино-, автомобиле- и судостроении, аэрокосмических изделиях и т.д.). Доля потребления алюминиевых сплавов, например, только в машиностроении в настоящее время составляет 30–40 % от общего потребления алюминиевых изделий всеми отраслями промышленности [1].

Для улучшения структуры Al–Si-сплавов и повышения физико-механических и эксплуатационных свойств литых изделий в литейном производстве применяют различные технологические операции (дегазация, рафинирование, фильтрация, модифицирование, физические способы обработки). К более современным методам получения более качественных литых изделий можно отнести физические виды обработки расплавов, которые основаны на использовании таких интенсивных параметров, как температура, давление, колебание и т.д. В настоящее время активно проводятся исследования эффективности таких физических способов обработки расплавов, как перегрев на 700 К и более выше линии ликвидуса [2–7], ультразвуковая [8–11] и магнитно-импульсная обработки (МИО) [12], обработка наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) [13, 14].

Физические методы обработки имеют ряд преимуществ, среди которых, в первую очередь, можно выделить экологичность и управляемость процессом. К отрицательным факторам, сдерживающим их внедрение в производство, можно отнести, прежде всего, недостаточную изученность и, зачастую, энергоемкость процессов, необходимость нового дополнительного оборудования.

Одним из перспективных физических способов обработки расплавов является воздействие на них электромагнитными акустическими полями (ЭМАП) [15]. Основной целью исследований, представленных в данной работе, являлось изучение влияния ЭМАП на структуру и свойства двойных сплавов Al–12%Si и Al–20%Si.

Материалы и методика исследований

Было исследовано влияние обработки расплавов электромагнитными акустическими полями на структуру и свойства сплавов Al–12%Si и Al–20%Si. Обработку осуществляли с помощью генератора «Сонар», который генерирует электромагнитные волны радиочастотного диапазона.

Генератор акустических колебаний размещали вблизи объекта воздействия (тигель с расплавом). Его подключали к электрической сети напряжением ~220 В, выходная мощность составляла 10 Вт. Излучатель электромагнитных волн погружали в расплав (рис. 1).

Излучатель, изготовленный из высокоуглеро-

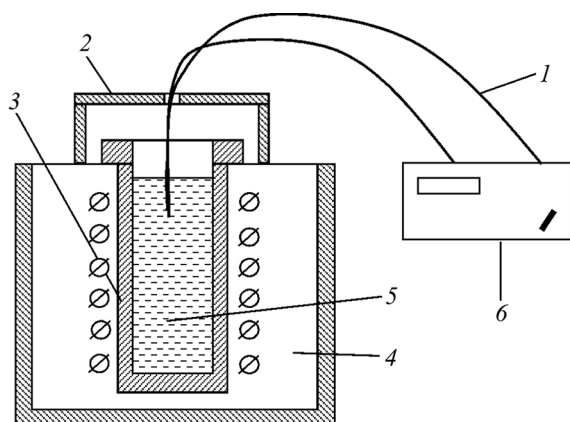


Рис. 1. Схема воздействия ЭМАП на расплав Al–Si
1 – излучатель; 2 – теплоизоляционная крышка; 3 – тигель;
4 – печь; 5 – расплав; 6 – генератор «Сонар»

дистой стали, представлял собой петлю-антенну с диаметром проволоки 2 мм.

Сплавы готовили в стальном окрашенном тигле печи сопротивления из электротехнических отходов алюминия и кристаллического кремния Кр1 фракции 5 мм по низкотемпературной технологии [16]. Масса плавки составляла 0,5 кг. Кремний вводили несколькими порциями в расплав, находящийся в твердожидком состоянии. При приготовлении сплава с 12 % Si ввод кремния осуществлялся двумя порциями, а с 20 % Si — тремя. Обработку расплава ЭМАП осуществляли в течение 1 мин сразу после замешивания в расплав каждой порции кремния. В процессе экспериментов варьировали частоту электромагнитного поля, наводимого в петле-антенне: 500, 1000 и 2000 кГц. После приготовления расплавы перегревали до температуры литья, рафинировали флюсом ФНК-А (ТУ 2149-008-43884713, Россия) в количестве 0,22 %, дегазировали препаратом «Дегазер» (ТУ 2458-002-79162668, Россия) в количестве 0,06 % от массы расплава, перемешивали и осуществляли заливку расплава в кокиль, получая прутки диаметром 20 мм и длиной 170 мм. Способы обработки расплавов приведены в табл. 1.

Механические испытания (определение предела прочности при растяжении (σ_B) и относительного удлинения (δ)) выполняли на «гагаринских» образцах (ГОСТ 1497-84: тип 3 номер 8) в литом состоянии. Для изучения микроструктуры из прутка на половине длины вырезали образцы высотой 20 мм, шлиф готовился в поперечном сечении. Исследования структуры проводили на растровом электронном микроскопе JOEL серии JSM-6390A. Количественный анализ осуществ-

Таблица 1
Обработка сплавов Al–12%Si и Al–20%Si

Вариант обработки	Способ обработки	$\nu_{\text{ЭМАП}}$, кГц
1	Дегазация + рафинирование	0
2	Дегазация + рафинирование + ЭМАП	500
3	Дегазация + рафинирование + ЭМАП	1000
4	Дегазация + рафинирование + ЭМАП	2000

ляли с помощью программно-аппаратного комплекса SIAMS-700.

Результаты и их обсуждение

В процессе экспериментов было установлено влияние ЭМАП на кинетику усвоения кремния для сплавов обоих составов. В отсутствие ЭМАП время растворения порции кремния составляло в среднем 10–15 мин. При введении излучателя было отмечено понижение вязкости расплава. Причем расплав оставался в твердожидком состоянии даже при уменьшении температуры на 5–10 °С по отношению к расплаву, который не подвергали обработке. Время растворения одной порции кремния при этом составляло 8–12 мин. Общее время приготовления расплава при использовании ЭМАП сократилось в среднем на 12 %.

Влияние варианта обработки на механические свойства сплавов Al–12%Si и Al–20%Si показано на рис. 2. Видно, что в эвтектическом сплаве Al–12%Si максимум механических свойств достигается при обработке расплава с частотой 500 кГц. Для заэвтектического сплава Al–20%Si увеличение δ и σ_B наблюдалось при использовании $\nu = 1000$ кГц. Обработка расплавов с 12 % Si способствует повышению предела прочности сплава на 13 %, а пластичности — на 17 %; в случае с 20 % Si отмечено возрастание σ_B на 9 %, а δ — на 65 %.

На образцах, имеющих в данном эксперименте максимальный прирост механических свойств, было проведено детальное изучение структуры. Микроструктуры сплавов Al–12%Si представлены на рис. 3. В структуре сплава (вариант 1 в табл. 1), который не подвергали обработке ЭМАП, видны единичные кристаллы первичного кремния размером 10–25 мкм, эвтектический кремний имеет крупноогольчатую морфологию. В целом такую

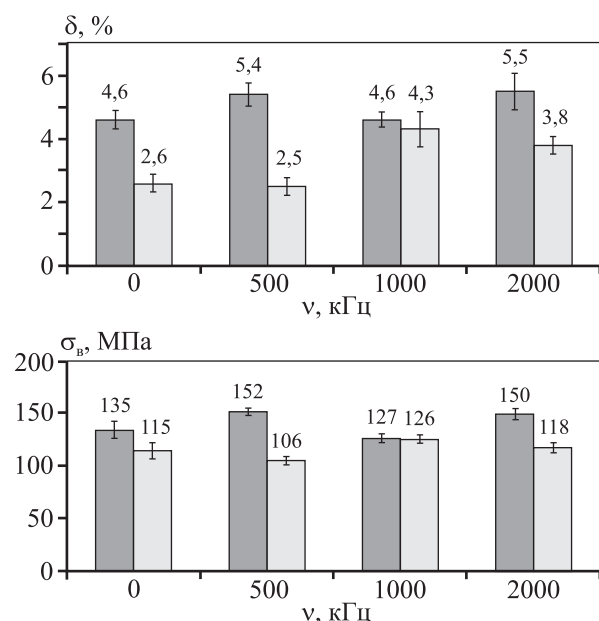


Рис. 2. Влияние частоты ЭМАП на механические свойства сплавов Al–12%Si и Al–20%Si. Слева (темный цвет) – Al–12%Si; справа (светлый) – Al–20%Si

Таблица 2

Размеры и количество фазовых составляющих сплавов Al–12%Si

Вариант обработки (см. табл. 1)	Кол-во, шт./мкм ²		d_{cp} , мкм	
	α -Al	Si ₃	α -Al	Si ₃
1	818	107	30	13
2	1012	149	22	10

микроструктуру можно охарактеризовать как типичную для сплава эвтектического состава в немодифицированном состоянии. После воздействия ЭМАП на расплав с частотой 500 кГц (вариант 2 в табл. 1) произошли следующие изменения в микроструктуре: исчезли кристаллы Si_п, уменьшилась длина и толщина ветвей Si₃, сформировались дендриты α -Al с компактной морфологией ветвей второго и третьего порядка. Микроструктура приобрела хорошо модифицированный вид. По сравнению с необработанным сплавом, воздействие ЭМАП способствовало увеличению количества частиц α -Al на 23 %, а Si₃ — на 39 %. Размер данных фазовых составляющих уменьшился на 22 и 36 % соответственно (табл. 2).

Микроструктуры сплавов Al–20%Si по вариантам обработки 1 и 3 (см. табл. 1) представлены на рис. 4.

В необработанном сплаве Al–20%Si сформировались крупные и разветвленные кристаллы Si_п.

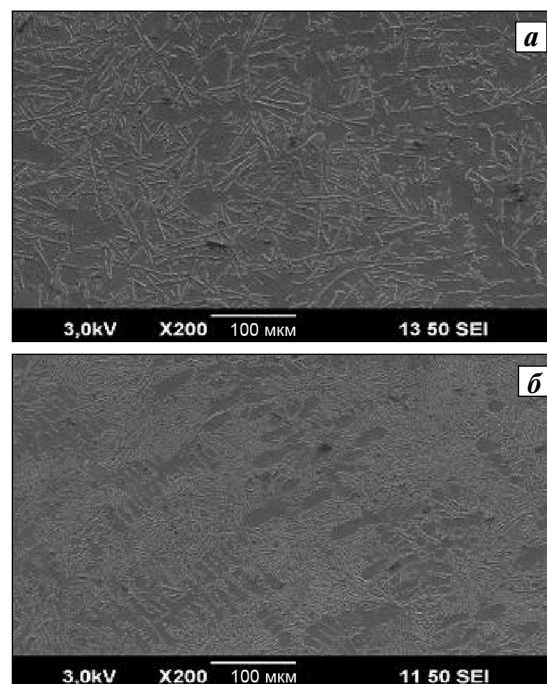


Рис. 3. Микроструктура сплавов Al–12%Si. а – без обработки расплава ЭМАП (см. 1 в табл. 1) б – с обработкой ЭМАП при $\nu = 500$ кГц (см. 2 в табл. 1)

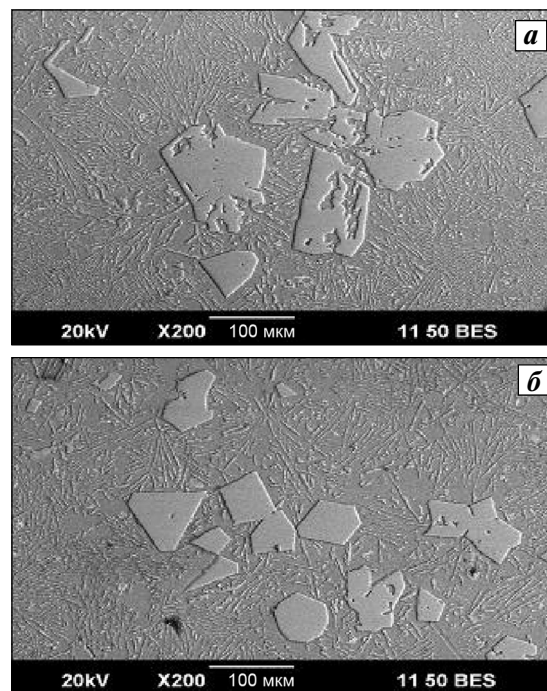


Рис. 4. Микроструктура сплава Al–20%Si. а – без обработки расплава ЭМАП (см. 1 в табл. 1) б – с обработкой ЭМАП при $\nu = 1000$ кГц (см. 3 в табл. 1)

После воздействия ЭМАП кристаллы Si_п приобрели более компактную форму. Данная микроструктура характерна для модифицированного сплава. Обработка расплава ЭМАП способствовала уве-

Таблица 3
**Размеры и количество
 фазовых составляющих сплавов Al–20%Si**

Вариант обработки	Кол-во, шт./мкм ²		$d_{\text{ср}}$, мкм	
	Si ₃	Si _п	Si ₃	Si _п
1	198	8	8	90
3	378	13	5	62

личению количества частиц Si₃ на 90 %, а Si_п — на 62 %. Средний размер данных фазовых составляющих уменьшился на 8 и 46 % соответственно (см. табл. 3).

Следует отметить, что в сплаве Al–20%Si ярко выраженный модифицирующий эффект был достигнут при обработке расплава ЭМАП с частотой волны 1000 кГц (для Al–12%Si — 500 кГц). При этом в структуре сплава заэвтектического состава в большей степени измельчились кристаллы первичного кремния. В сплаве эвтектического состава степень измельчения α -Al и Si₃ была сопоставима.

Интенсификацию процессов растворения частиц кристаллического кремния в расплаве при воздействии ЭМАП и измельчение фазовых составляющих в литой структуре сплавов можно объяснить следующими процессами. Электромагнитные волны, генерируемые контуром антенны, которая погружена в расплав, преобразуются в упругой среде в акустические волны низкочастотного ультразвукового диапазона. Прохождение таких волн по объему расплава вызывает интенсивные металлопотоки и перераспределение твердых частиц кремния. При этом снижается поверхностное натяжение на границе «твердая частица — дисперсионная среда», улучшается смачивание и увеличивается площадь поверхности контакта. За счет данных эффектов алюминиевый расплав проникает по микротрещинам в глубь частиц и вызывает в них растягивающие напряжения, которые способствуют ускоренному твердофазному дроблению. Затем вновь образовавшиеся микрочастицы эволюционируют до элементов структуры расплава коллоидных и кластерных масштабов. Измененное строение расплава наследуется в процессе кристаллизации литой структурой сплавов.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что выбор параметров обработки расплавов системы Al–Si электромагнитны-

ми акустическими полями должен обуславливаться содержанием Si в сплаве. С увеличением концентрации кремния необходимо использовать ЭМАП с большей частотой колебания волн. Воздействие ЭМАП на Al-расплавы способствует интенсификации процессов растворения в них тугоплавких легирующих компонентов, что позволяет снижать температуру расплава и сокращать время его приготовления. Физический способ обработки расплавов электромагнитными акустическими полями дает возможность получать модифицированную мелкокристаллическую структуру сплавов и, как следствие, повышать их механических свойств. Однако для определения оптимальных параметров обработки в зависимости от структуры исходной шихты и природы сплавов требуются дополнительные исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» (код 818).

Литература

1. *Nappi C.* The global aluminium industry 40 years from 1972 // World Aluminium. 2013. P. 1–27.
2. *Brodova I.G., Popel P.S., Eskin G.I.* Liquid metal processing: application to aluminium alloy production. N.Y.: Gordon&Breach. L., 2004.
3. *Деев В.Б.* Получение герметичных алюминиевых сплавов из вторичных материалов. М.: Флинта: Наука, 2006.
4. *Wang J., He S., Sun B., Zhou Y., Guo Q., Nishio M.* A356 alloy refined by melt thermal treatment // Int. J. Cast Met. Res. 2001. No. 14. P. 165–168.
5. *Gu Z.H., Wang H.Y., Zheng N., Zha M., Jiang L.L., Wang W., Jiang Q.C.* Effect of melt superheating treatment on the cast microstructure of Mg–1.5Si–1Zn alloy // J. Mater. Sci. 2008. Vol. 43. No. 3. P. 980–984.
6. *Liu Z., Liu X.M., Xie M.* Microstructure and properties of in situ Al–Si–Mg₂Si composite prepared by melt superheating // Appl. Mech. Mater. 2011. Vol. 52–54. P. 750–754.
7. *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.
8. *Эскин Г.И.* Влияние кавитационной обработки расплава на структуру и свойства литых и деформиро-

- ванных легких сплавов // Вестн. РАЕН. 2010. No. 3. С. 82—89.
9. Han Y., Li K., Wang J., Sun B. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al—5Ti—1B master alloy on aluminium // Mater. Sci. Eng. A. 2005. Vol. 405. P. 306—312.
 10. Jian X., Xu H., Meek T.T., Han Q. Effect of power ultrasound on solidification of aluminium A356 alloy // Mater. Lett. 2005. No. 59. P. 190—193.
 11. Bhojak K., Mavani A., Bhatt N. Ultrasonic treatment to molten FEM[©]™ aluminum alloy and effects of ultrasound treatment melt temperature on hardness // Int. J. Res. Adv. Eng. 2013. Vol. 1. No. 3. P. 1—12.
 12. Глушченков В.А., Черников Д.Г., Никитин В.И., Никитин К.В. О воздействии импульсных магнитных полей на расплавы // Металлургия машиностроения. 2012. No. 4. С. 47—50.
 13. Белкин В.С., Бухарин В.А., Дубровин В.К. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение / Под ред. В.В. Крымского. Челябинск: Татьяна Лурье, 2001.
 14. Ри Э.Х., Ри Хосен, Дорофеев С.В., Якимов В.И. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов. Владивосток: Дальнаука, 2008.
 15. Зарембо В.И. Фоновое резонансно-акустическое управление гетерофазными процессами // Теорет. основы хим. технологии. 2006. Т. 49. No. 5. С. 520—532.
 16. Никитин В.И., Никитин К.В., Тимошкин И.Ю. Способ приготовления мелкокристаллической алюминиево-кремниевой лигатуры: Пат. 2448180 (РФ). 2011.
 - cast microstructure of Mg—1.5Si—1Zn alloy. *J. Mater. Sci.* 2008. Vol. 43. No. 3. P. 980—984.
 6. Liu Z., Liu X.M., Xie M. Microstructure and properties of in situ Al-Si-Mg₂Si composite prepared by melt superheating. *Appl. Mech. Mater.* 2011. Vol. 52—54. P. 750—754.
 7. 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.
 8. Eskin G.I. Vliyanie kavitatsionnoi obrabotki rasplava na strukturu i svoistva litykh i deformirovannykh lyegkikh splavov [The influence of cavitation treatment of the melt on the structure and properties of cast and deformed light alloys]. *Vestnik RAEN.* 2010. No. 3. P. 82—89.
 9. Han Y., Li K., Wang J., Sun B. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al—5Ti—1B master alloy on aluminium. *Mater. Sci. Eng. A.* 2005. Vol. 405. P. 306—312.
 10. Jian X., Xu H., Meek T.T., Han Q. Effect of power ultrasound on solidification of aluminium A356 alloy. *Mater. Lett.* 2005. No. 59. P. 190—193.
 11. Bhojak K., Mavani A., Bhatt N. Ultrasonic treatment to molten FEM[©]™ aluminum alloy and effects of ultrasound treatment melt temperature on hardness. *Int. J. Res. Adv. Eng.* 2013. Vol. 1. No. 3. P. 1—12.
 12. Glushchenkov V.A., Chernikov D.G., Nikitin V.I., Nikitin K.V. O vozdeistvii impul'snykh magnitnykh polei na rasplavy [About the effects of pulsed magnetic fields on the melt]. *Metallurgiya mashinostroeniya.* 2012. No. 4. P. 47—50.
 13. Belkin V.S., Bukharin V.A., Dubrovin V.K. Nanosekundnye elektromagnitnye impul'sy i ikh primeneniye [Nanosecond electromagnetic pulses and their application]. *Chelyabinsk: Tatiana Lurie,* 2001.
 14. Ri E.H., Ri Hosen, Dorofeev S.V., Yakimov V.I. Vliyanie oblucheniya zhidkoi fazy nanosekundnymi elektromagnitnymi impul'sami na ee stroenie, protsessy kristallizatsii, strukturoobrazovaniya i svoistva liteinykh splavov [Effect of irradiation of the liquid phase by nanosecond electromagnetic pulses on its structure, crystallization, structure and properties of casting alloys]. *Vladivostok: Dal'nauka,* 2008.
 15. Zarembo V.I. Fonovoe rezonansno-akusticheskoe upravlenie geterofaznymi protsessami [Background resonance-acoustic control of heterophase processes]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii.* 2006. Vol. 49. No. 5. P. 520—532.
 16. Nikitin V.I., Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu. Sposob prigotovleniya melkokristallicheskoj alyuminievo-kremnievoj ligatury [Method of preparing finely-crystalline aluminum-silicon master-alloy]: Pat. 2448180 (RF). 2011.

References

1. Nappi C. The global aluminium industry 40 years from 1972. *World Aluminium.* 2013. 1—27.
2. Brodova I.G., Popel P.S., Eskin G.I. Liquid metal processing: application to aluminium alloy production. N.Y.: Gordon&Breach. L., 2004.
3. Deev V.B. Poluchenie germetichnykh alyuminievykh splavov iz vtorychnykh materialov [Obtaining a sealed aluminum alloys from recycled materials]. Moscow: Flinta: Nayka, 2006.
4. Wang J., He S., Sun B., Zhou Y., Guo Q., Nishio M. A356 alloy refined by melt thermal treatment. *Int. J. Cast Met. Res.* 2001. No. 14. P. 165—168.
5. Gu Z.H., Wang H.Y., Zheng N., Zha M., Jiang L.L., Wang W., Jiang Q.C. Effect of melt superheating treatment on the