



УДК 669.017

Поступила 08.12.2014

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С УЧАСТИЕМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО Al-Si-СПЛАВА

## THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT WITH THE LIQUID PHASE ON FORMATION OF A MICROSTRUCTURE OF EUTECTIC Al-Si-ALLOY

А. И. АНИКИН, С. В. БЕЛЯЕВ, В. П. ЖЕРЕБ, В. И. АНИКИНА, Т. Р. ГИЛЬМАНШИНА,  
А. Ю. СЕМУШЕВА, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

A. ANIKIN, S. BELYAEV, V. ZHEREB, V. ANIKINA, T. GIL'MANSHINA, A. SEMUSHEVA,  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

*Рассмотрено влияние режимов термической обработки на структуру эвтектического Al-Si-сплава. Проведено теоретическое обоснование процесса на основе данных термоанализа и полученных микроструктур.*

*The effect of heat treatment on the structure of the eutectic Al-Si-alloy, a theoretical substantiation process based on thermal analyzer and cooked microstructures was presented in this paper.*

**Ключевые слова.** Эвтектика, силумин, Al-Si, термоанализатор, дифференциальная термограмма, микроструктура.

**Keywords.** Eutectic, silumin, Al-Si, thermal analyzer, differential thermogram, microstructure.

В последнее время во многих странах сохраняется интерес к формированию алюминиевых и других сплавов в твердо-жидком состоянии, которое практически не используется в отечественной металлургии и машиностроении. Этот процесс получил свое развитие после открытия Д. В. Спенсером (Массачусетский технологический институт) в начале 1971 г. аномальных свойств полужидкого недендритного сплава [1].

Он установил, что при одном и том же содержании твердой фракции при переходе от дендритной к недендритной структуре полужидкого сплава напряжение сдвига уменьшается примерно на три порядка, что открывает большие возможности в изготовлении изделий самой сложной формы с минимальными энергетическими затратами.

Исследования практических вариантов применения открытия Д. В. Спенсера показали, что наибольшее распространение нашли три принципиальные схемы получения сплавов с недендритной структурой и изделий из них в твердо-жидком состоянии.

1. Получение жидкого сплава и последующее его охлаждение в интервале кристаллизации в кокиле или другой форме при интенсивном перемешивании для разрушения ветвей дендритов и превращения отдельных дендритов в глобулы или сфероиды, окруженные прослойкой жидкой фазы.

2. Получение мелкозернистой структуры в твердом слитке с последующим нагревом его до твердо-жидкого состояния, когда каждое зерно, оплавляясь с поверхности, будет окружено прослойкой жидкой фазы, и деформацией заготовки в контейнере пресса или штампе («thixocasting», «thixoforging», «thixoforging» – тиксолитье, тиксоформирование, тиксоштамповка).

3. Сверхбыстрое охлаждение капель жидкого сплава и осаждение их в твердо-жидком состоянии на подложку, в том числе и с последующей деформацией [1].

Настоящая работа посвящена изучению способа термической обработки, отличительной особенностью которой является протекание процессов в области субликвидусных температур, за счет контактного плавления на межфазных границах и образования некоторого количества жидкости эвтектического состава [2].

Чтобы подтвердить теоретическое обоснование процесса, происходящего во время перегрева над температурой эвтектического равновесия, были проведены исследования на термоанализаторе на основе дериватографа.

Эксперимент проведен на образцах эвтектического сплава Al-11,7%Si. Дифференциальная термограмма первого образца показана на рис. 1, где отображено протекание процессов, происходящих с образцом в ходе проведения первого эксперимента. Синяя линия характеризует состояние образца, являясь зависимостью градиента температур ( $T_{обр} - T_{печи}$ , где  $T_{обр}$  – температура обработки, °C;  $T_{печи}$  – температуре печи, °C) от времени. Образец постепенно нагревали. По истечении 30 мин образец, превысив температуру эвтектического равновесия, начал плавиться. На рис. 2 показано начало эндотермического эффекта. Плавление происходило вплоть до температуры 600 °C, при этой температуре образец был полностью расплавлен. После чего осуществлялась выдержка в течение 5 мин и последующее быстрое охлаждение (рис. 1, синяя линия). Наличие экзотермического эффекта связано с процессом кристаллизации.

Дифференциальная термограмма второго образца показана на рис. 3.

Аналогично предыдущему опыту образец постепенно нагревали. Нагрев производили на 8 °C выше температуры эвтектического равновесия. Спустя 15 мин образец начал оплавляться. После чего осуществлялась выдержка в течение 5 мин и последующее быстрое охлаждение (рис. 3, синяя линия).

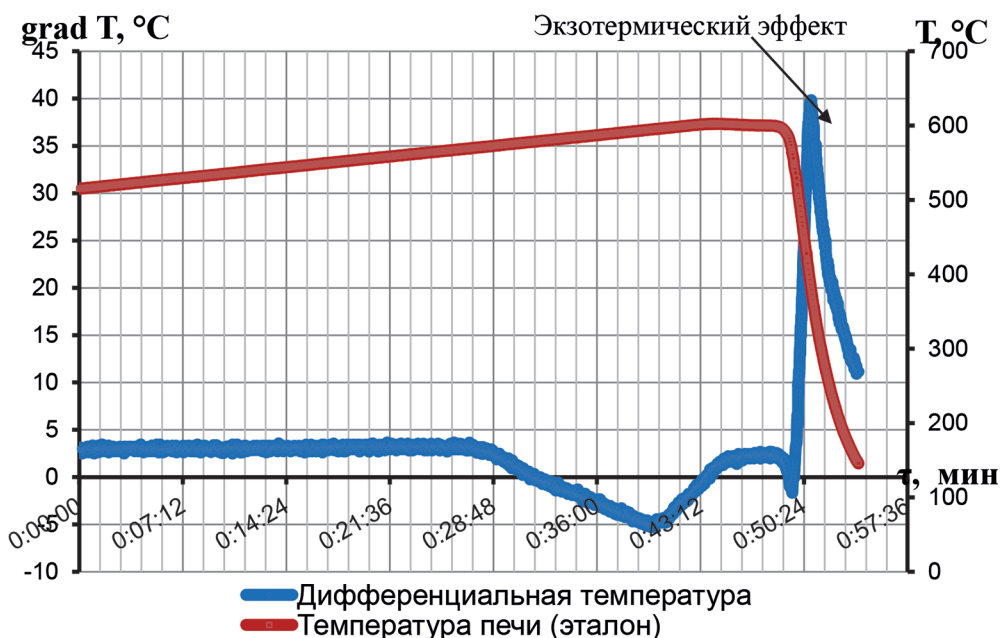


Рис. 1. Дифференциальная термограмма образца при максимальной температуре 600 °C

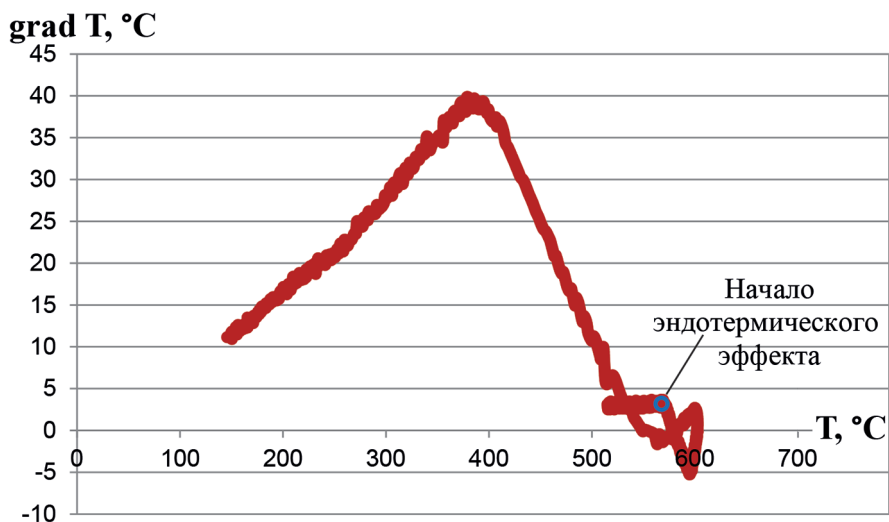


Рис. 2. Зависимость градиента температур от эталона при максимальной температуре 600 °C

Данные термограммы свидетельствуют о том, что процесс плавления был не завершен и перекристаллизация идет в присутствии жидкости эвтектического состава.

Для наибольшей наглядности разницы между проведенными экспериментами был построен график (рис. 4), на котором отмечена термическая обработка в субликвидусном интервале температур.

Из рис. 5 видно, что разница между максимальными температурами нагрева будет определять долю жидкой фазы, т. е. время нахождения системы в состоянии, в котором возможен быстрый процесс перекристаллизации сплава [3].

Термограммы двух экспериментов показаны на рис. 5.

Исходя из того, что долю жидкой фазы в образце показывает площадь экзотермического эффекта, были сделаны некоторые расчеты.

Площадь эффекта пропорциональна количеству теплоты, выделившейся в образце в процессе фазового перехода, с учетом коэффициента пропорциональности системы:

$$S \sim kQ^*$$

где  $S$  – площадь эффекта;  $Q^*$  – количество теплоты;  $k$  – приборная константа.

Количество выделившейся теплоты – это произведение массы вещества, в нашем случае жидкости, на удельную теплоту фазового перехода:

$$Q^* = mQ^M.$$

В первом приближении площадь под кривой экзотермического эффекта представляет собой треугольник. Зная координаты вершин треугольника, можно найти саму величину площади:

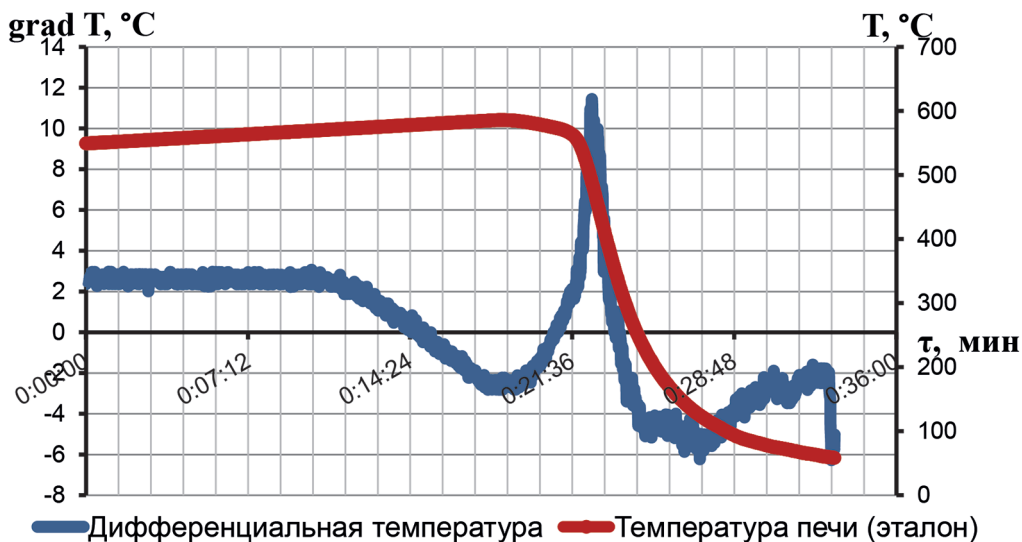


Рис. 3. Дифференциальная термограмма образца при максимальной температуре 585 °C

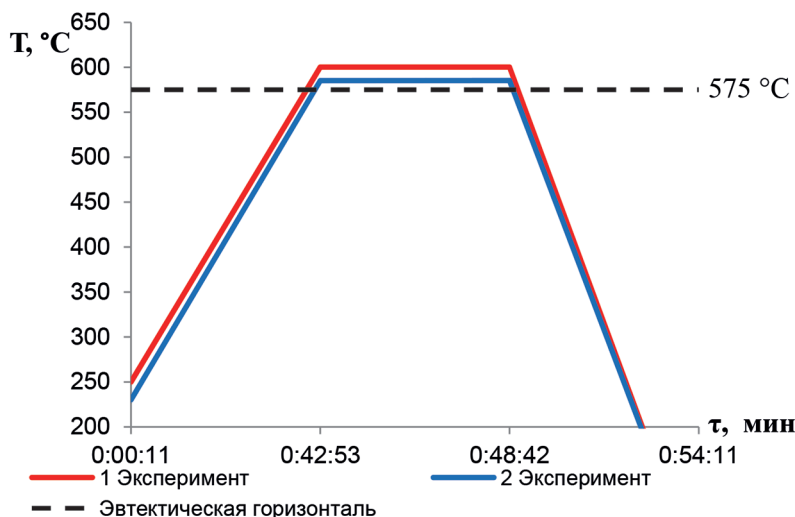


Рис. 4. Разница режимов термической обработки сплавов в ходе экспериментов

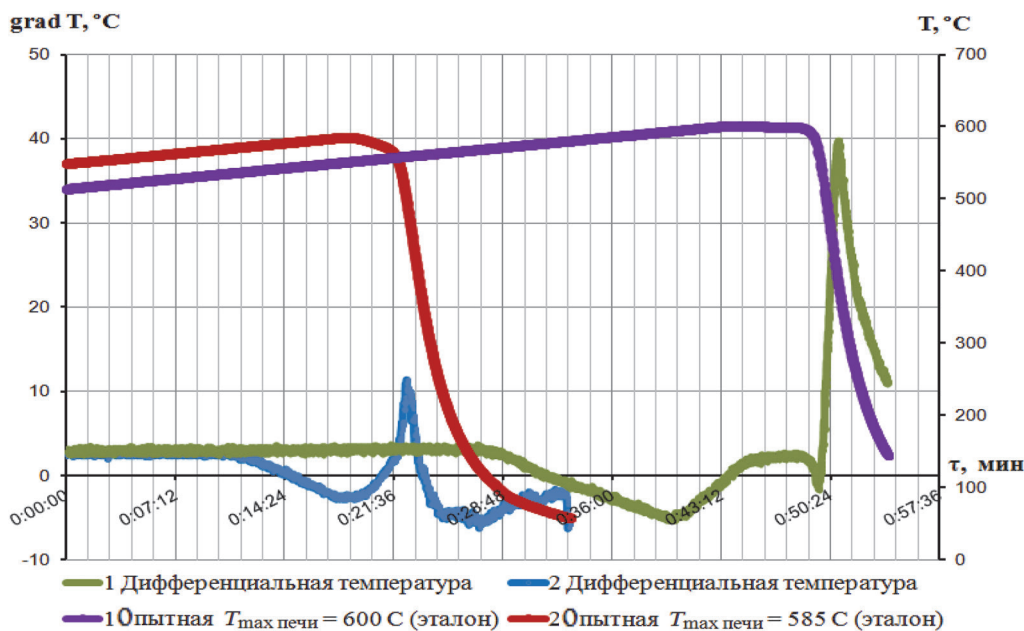


Рис. 5. Дифференциальные термограммы образцов для двух опытов

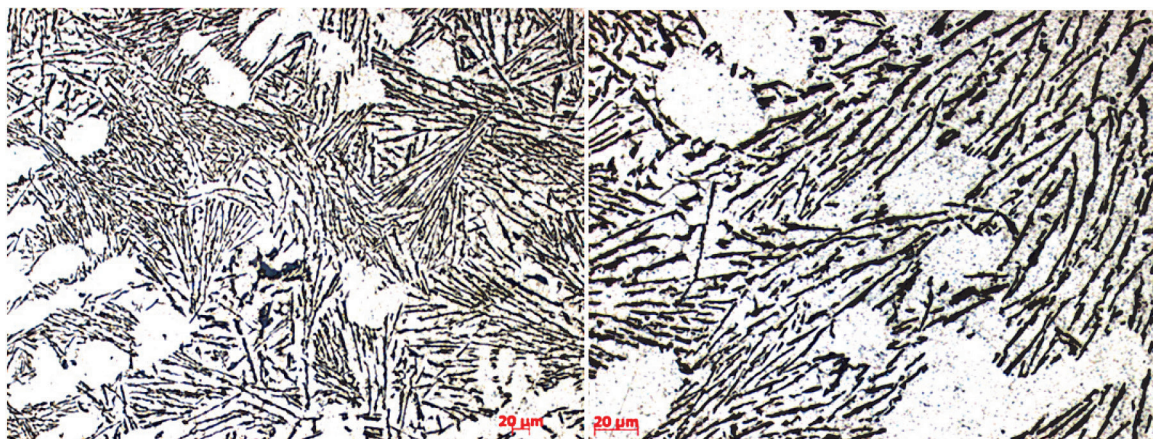


Рис. 6. Микроструктура образца первого эксперимента при максимальной температуре 600 °С

$$S = \frac{1}{2} \{ (x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3) \}.$$

В качестве значений  $x$  было взято время в минутах,  $y$  соответствовал градиенту температур, таким образом, были получены следующие результаты:  $S_1 = 173,33$  кв.ед. – для образца, нагретого до 600 °С,  $S_2 = 36,15$  кв.ед. – для образца, нагретого до 585 °С.

Грубая оценка говорит о том, что разница в количестве жидкой фаз  $\sim 1/4$ , другими словами, 1/4 часть образца, нагретого до температуры на 8 °С выше эвтектической горизонтали, оплавилась. Оставшаяся часть осталась в исходном состоянии.

Микроструктуры образцов после проведения при данных режимах термической обработки еще раз подтверждают результаты проведенных экспериментов (рис. 6, 7).

Микроструктура образца после термической обработки с полным оплавлением демонстрирует структуру прежнего литого образца, закристаллизованного с температуры 600 °С (рис. 6).

Светлые участки на микроструктурах показывают расположение  $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия, а темные – кремния.

Данный метод испытаний на дериватографе позволяет определить, насколько частичное плавление является контактным. В ходе частичного оплавления некоторая доля объема переходит в жидкое состояние. Определив эту долю, можно говорить о степени ее влияния на процесс перекристаллизации.

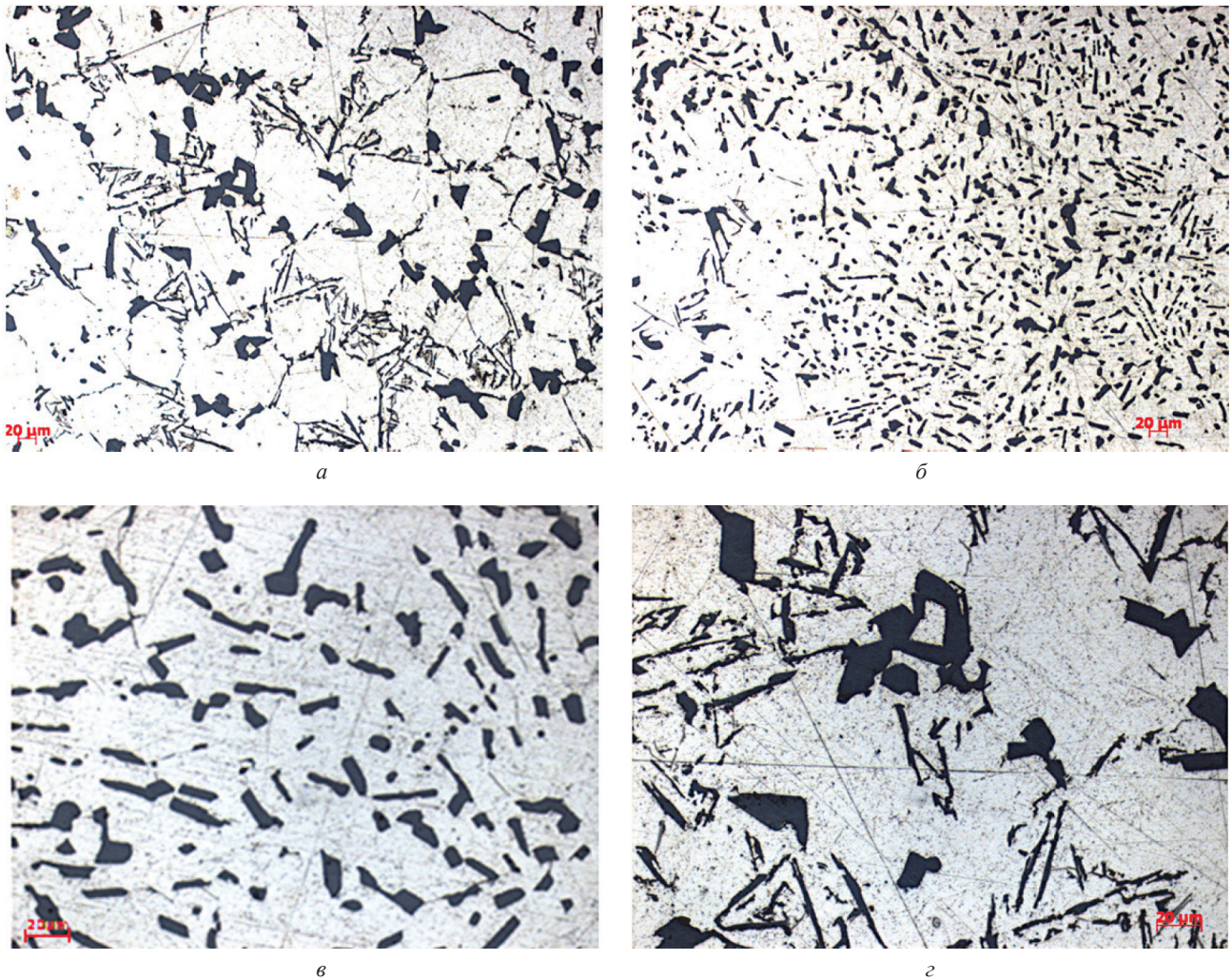


Рис. 7. Микроструктура образца второго эксперимента при максимальной температуре 585 °С. а, б –  $\times 200$ ; в, г –  $\times 500$

Проведение термической обработки доэвтектических, эвтектических и заэвтектических сплавов при различных режимах позволило выбрать оптимальные условия ее реализации и сформировать последовательную схему термической обработки:

- нагрев с печью вблизи температуры эвтектического равновесия в течение определенного времени;
- охлаждение образцов с печью до температур максимальной растворимости легирующих элементов;
- последующее незамедлительное охлаждение в воде комнатной температуры, которое сохраняет в закаленном образце степень гетерогенности раствора, возникшего при нагреве и длительном выдерживании, предотвращая диффузионное перераспределение компонентов [2].

В ходе анализа микроструктур была выявлена общая закономерность прохождения процессов фазового перераспределения при термической обработке для доэвтектических, эвтектических и заэвтектических сплавов.

Основным результатом исследованного способа является разделение микроструктуры эвтектического сплава на отдельные составляющие и объединение этих составляющих между собой.

В структуре эвтектического силумина после предлагаемой термообработки образуются отдельные крупные кремниевые кристаллы, практически равномерно распределенные в алюминиевом твердом растворе. Проведение термической обработки алюминий-медного сплава приводит к гетерофазному разделению двойной (пластинчатой) эвтектики ( $Al+CuAl_2$ ) за счет диффузионных процессов на округлые частицы  $CuAl_2$ -фазы в  $\alpha$ -твердом растворе на основе меди.

Алюминиево-кремниевые сплавы, в особенности с высоким содержанием кремния, широко используются в автомобильной и авиационной промышленности благодаря своей низкой плотности, высокой износостойкости, высоким антикоррозионным свойствам и низкому коэффициенту теплового расширения.

ния. При получении алюминиево-кремниевого сплава традиционным способом обычно образуются крупные частицы кремния и эвтектические аккумуляторные плиты, что приводит к резкому увеличению хрупкости сплавов. Следовательно, возникают сложности, если требуется улучшить микроструктуру после кристаллизации [4].

Рассмотренный режим термической обработки заэвтектического силумина (Al–17,5%Si), температура под закалку 585 °С, время термообработки 5 ч, охлаждение с печью до 410 °С (температуры максимальной растворимости Si в алюминиевом твердом растворе) может быть предложен как альтернатива способам улучшения микроструктуры после литья.

Исследования термической обработки образцов в субликвидусном интервале температур на дериватографе доказали проходящие процессы контактного плавления и образование жидкости эвтектического состава [5].

Проводя подобные предварительные эксперименты на образцах малых размеров, определяя количество теплоты, необходимой для прохождения процессов фазовой перекристаллизации, можно давать рекомендации в выборе режима термической обработки сплава, задавая необходимую температуру перегрева над эвтектической горизонталью.

### Литература

1. Горбунов Ю. А. Состояние и проблемы развития производства алюминиевых сплавов с недендритной тиксотропной структурой и полуфабрикатов из них методами деформации в твердо-жидком состоянии // Тр. третьего междунар. конгресса «Цветные металлы - 2011». Красноярск, 2011. С. 573–578.
2. Аникина В. И. и др. Способ формирования микроструктуры эвтектического Al–Si-сплава. Патент РФ 2525872, 2014.
3. Грачев С. В., Бараз В. Р., Богатов А. А., Швейкин В. П. Физическое металловедение. Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. техн. ун-та, 2001. 534 с.
4. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. М.: Metallurgy, 1978, 312 с.
5. Биронт В. С., Блохин И. В., Аникин А. И. Кластеризация как основа регулирования структуры конструкционных материалов // Современные технологии ресурсов. 2010. № 8. С. 390–392.

### References

1. Gorbunov Y. A. Sostoyaniye i problemy razvitiya proizvodstva aluminievyykh splavov s nedendritnoy tiksotropnoy strukturoy i polufabrikatov iz nih metodami deformatsii v tverdo-zhidkom sostoyanii [State and problems of development of production of aluminum alloys with non-dendritic structure of the thixotropic and semi-plastic deformation of them in a solid-liquid state]. *Trudy tretogo mezhdunarodnogo kongressa «Tsvetnyye metally – 2011»* [Proc. 3th Int. Congress «Non-Ferrous Metals – 2011»]. Krasnoyarsk, 2011, pp. 573–578.
2. Anikina V. I. et al. Sposob formirovaniya mikrostrukturyi evtekticheskogo Al–Si splava [A method of forming a microstructure eutectic Al–Si alloy]. *Patent RU*, no. 2525872, 2014.
3. Grachev S. V., Baraz V. R., Bogatov A. A., Shveikin V. P. *Fizicheskoe metallovedenie* [physical metallurgy]. Ekaterinburg: Uralsky State. Tech. Univ., 2001, 534 p.
4. Taran Yu. V., Mazur V. I. *Struktura evtekticheskikh splavov* [The structure of the eutectic alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978, 312 p.
5. Biront V. S., Blokhin I. V., Anikin A. I. Klasterizatsiya kak osnova regulirovaniya strukturyi konstruksionnykh materialov [Clustering as a basis for regulating the structure of structural materials]. *Modern technology resources*, 2010, no. 8, pp. 390–392.

### Сведения об авторах

Беляев Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доцент, кафедра литейного производства ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: 244812@mail.ru.

Жереб Владимир Павлович, д-р хим. наук, доцент, кафедра металловедения и термической обработки металлов ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: vpzhereb@rambler.ru.

Гильманишина Татьяна Ренатовна, канд. техн. наук, доцент, кафедра литейного производства ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: gtr1977@mail.ru.

### Information about the authors

Belyaev Sergey Vladimirovich, Doctor of Science, Associate Professor, department «Foundry production» Siberian Federal University, 79 Svobodny, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: 244812@mail.ru.

Zhereb Vladimir Pavlovich, Doctor of Science, Associate Professor, department «Metallurgy and heat treatment of metals» Siberian Federal University, 79 Svobodny, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: vpzhereb@rambler.ru.

Gil'manshina Tatiana Renatovna, Candidate of Engineering Sciences, associate professor, department «Foundry production» Siberian Federal University, 79 Svobodny, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: gtr1977@mail.ru.