

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПЕРЕГРЕВА И ЗАЛИВКИ РАСПЛАВА НА КАЧЕСТВО ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

© 2017 г. В.Б. Деев, К.В. Пономарева, О.Г. Приходько, С.В. Сметанюк

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

ООО «Металл-НВК», г. Новокузнецк

Статья поступила в редакцию 03.10.16 г., доработана 06.12.16 г., подписана в печать 08.12.16 г.

Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) в настоящее время является одним из эффективных и перспективных способов получения высококачественных тонкостенных отливок, обладающих заданной размерной точностью, требуемой чистой поверхностью и другими свойствами. Данная технология находит широкое распространение при производстве изделий из алюминиевых сплавов. Для обеспечения минимизации затрат при изготовлении изделий и получения качественных отливок целесообразно использовать повышенное количество вторичных материалов в шихте, уделяя при этом внимание температуре перегрева и времени выдержки расплава. Приведены результаты исследования температурных режимов плавки и заливки алюминиевых сплавов при ЛГМ. В рассматриваемых производственных условиях наиболее эффективными режимами, обеспечивающими наилучшие качественные показатели герметичных отливок по размерной точности и чистоте поверхности, оказались: температура перегрева расплава – 880÷890 °С, температура заливки в литейную форму – 820÷830 °С. Изучено влияние различных вариантов температурных параметров плавки и заливки расплава состава АК7 при ЛГМ на содержание неметаллических включений в литом состоянии. Выявлено, что минимальное содержание $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в готовом сплаве обеспечивают: температура перегрева расплава – до 880÷890 или 940÷950 °С, температура заливки в литейную форму – 820÷830 °С.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, силумины, плавка, расплав, заливка, отливка, качество литья, неметаллические включения, газифицируемые модели, ресурсосберегающая технология.

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

Пonomарева К.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). E-mail: kiraponomareva525@mail.ru.

Приходько О.Г. — канд. техн. наук, доцент кафедры менеджмента качества СибГИУ. E-mail: prihodko_og@rambler.ru.

Сметанюк С.В. — вед. инженер ООО «Металл-НВК» (654063, г. Новокузнецк, ул. Рудокопровая, 4). E-mail: dnvk@mail.ru.

Для цитирования: Деев В.Б., Пономарева К.В., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние температур перегрева и заливки расплава на качество отливок из алюминиевых сплавов при литье по газифицируемым моделям // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 3. С. 65–71. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-65-71.

Deev V.B., Ponomareva K.V., Prihodko O.G., Smetanyuk S.V.

The effect of overheating temperature and melt pouring temperature on the aluminum alloy casting quality in lost foam casting

Lost foam casting (LFC) is currently one of the most effective and promising methods to produce high-quality thin-walled castings that exhibit a desired dimensional accuracy, the required surface roughness, and other properties. This technology is widely used in the manufacture of aluminum alloys products. In order to ensure cost minimization in the manufacture of products and the production of quality castings, it is advisable to use an increased amount of recycled material in the charge, paying attention to the overheating temperature and the melt holding time. The paper presents research findings on temperature regimes of melting and casting of aluminum alloys during LFC. Under the concerned industrial conditions, the following regimes were most effective to ensure the best quality indicators of leak-tight castings with respect to dimensional accuracy and surface roughness: melt overheating temperature – 880÷890 °С, pouring temperature – 820÷830 °С. The paper studies the effect of different temperature parameter options for melting and casting of the AK7 melt composition during LFC on the content of nonmetallic inclusions in the as-cast state. It was found that the minimum content of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ in the finished alloy was provided by the melt overheating temperature up to 880÷890 or 940÷950 °С, and the pouring temperature of 820÷830 °С.

Keywords: aluminum alloys, silumins, melting, melt, pouring, casting, casting quality, nonmetallic inclusions, lost pattern, resource-saving technology.

Deev V.B. — Dr. Sci. (Tech), prof. of the Department of foundry technologies and art processing materials, chief scientific officer of 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.

Ponomareva K.V. — Cand. Sci. (Tech.), lecturer of the Department of material science, foundry and welding production of the Siberian State Industrial University (SibSIU) (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirov str., 42). E-mail: kiraponomareva525@mail.ru.

Prihodko O.G. — Cand. Sci. (Tech.), lecturer of the Department of quality management of the SibSIU. E-mail: prihodko_og@rambler.ru.

Smetanyuk S.V. — leading engineer of LLC «Metal NVK» (654063, Russia, Novokuznetsk, Rudokoprovaya str., 4). E-mail: dnvk@mail.ru.

Citation: Deev V.B., Ponomareva K.V., Prihodko O.G., Smetanyuk S.V. Vliyanie temperatur peregreva i zalivki rasplava na kachestvo otlivok iz alyuminievykh splavov pri lit'e po gazifitsiruemykh modelyam. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 3. P. 65–71. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-65-71.

Введение

Технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) является одним из прогрессивных способов получения высококачественных отливок [1–4]. Все более широкое распространение данная технология находит при производстве алюминиевых изделий [5–20].

Технологический процесс ЛГМ весьма сложен и включает достаточно много операций, начиная от подготовки полистирола и заканчивая выбивкой отливок.

Следует отметить, что технология плавки и состояние расплава перед заливкой в литейные формы могут оказать значительное влияние на качество получаемого литья. Особенно это актуально при реализации ресурсосберегающих технологий, когда используется повышенное количество вторичных материалов в шихте [21–23]. Однако в технологиях ЛГМ вопросам технологии плавки уделяется недостаточное внимание, а все усилия сконцентрированы, как правило, на проблемах, связанных с технологией литейной формы, — процессах изготовления моделей, модельных блоков и литниковой системы, размещении «кустов» в опоках, формовке, вакуумировании, заливке и т.д.

В данной работе приведены результаты исследования влияния температурных режимов плавки и заливки сплава АК7 на качество тонкостенных отливок «Крышка корпуса газоанализатора», полученных способом ЛГМ в условиях ООО «НПП Вектор машиностроения» (г. Новокузнецк), с применением повышенного количества вторичных материалов в шихте (50–55 % лома и отходов).

Качество этих отливок в производственных условиях оценивается по таким показателям, как чистота поверхности, размерная точность, герметичность, прочность (микроструктуру не анализировали). Анализ дефектов отливок показал, что существует необходимость выбора рациональных

температурных параметров плавки и заливки расплава в литейную форму. Для обеспечения минимизации затрат на производство изделий целесообразно использовать повышенное количество вторичных материалов в шихте, при этом следует уделять внимание температуре перегрева, времени выдержки расплава, температуре заливки в литейную форму.

Методика проведения эксперимента

Объектом исследования был промышленный алюминиевый сплав АК7 (ГОСТ 1583-93). Для его приготовления использовали чушковый сплав АК7, а также вторичные материалы этого же сплава — лом деталей, отходы литейного и механического цехов. Вторичные материалы во всех вариантах содержали ~50 мас.% мелкого лома и отходов сплавов и ~50 мас.% брикетированной стружки. Все отходы были предварительно очищены и обработаны в соответствии со стандартными требованиями.

Состав шихтовых материалов включал чушковый силумин АК7 (45–50 мас.%), возврат и отходы сплава АК7 (около 50–55 мас.%). Плавки проводили в печи ИСТ-0,06, при этом температуру перегрева ($T_{\text{пер}}$) расплава изменяли от 800 до 1000 °С с шагом ~50 °С. Температуру заливки ($T_{\text{зал}}$) расплава в зависимости от варианта плавки варьировали от ~800 до ~900 °С, при этом заливку осуществляли через стеклосетку фильтровальную марки ССФ-0,6.

Для формовки применяли кварцевый песок 2К10302. При изготовлении газифицируемых моделей использовали полистирол фирмы STYROCHEM (г. Монреаль, Канада). Готовые модельные блоки (4 «куста» по 8 моделей) с помощью специального устройства помещали вертикаль-

но в подвешенном состоянии в опоку размером 700×700×700 мм. Засыпку песка в опоку проводили одновременно с ее вибрацией (частота ~36 Гц), которую осуществляли посредством закрепленных на ней двух электрических вибраторов (3000 об/мин). Затем опоку накрывали пленкой, размещали заливочное устройство, вакуумировали литейную форму и производили заливку расплава. После охлаждения осуществляли выбивку отливок, опилку, пескоструйную зачистку. Для выявления качественных показателей литья оценивали чистоту поверхности и размерную точность отливок путем сравнения с эталонными образцами.

Если в одной серии в 4 «кустах» из 32 отливок (рис. 1) более 3 отливок суммарно или по отдельности не удовлетворяли тому или иному требуемому показателю, то вариант перегрева и заливки считался неэффективным для данной технологии. Если в каком-либо варианте в любой серии наблюдалась недостаточная прожигаемость пенополистирольного модельного блока в любой его части, то вариант технологии относили к неэффективным. Кроме того, если в в каком-либо варианте в любой серии из случайной выборки 10 годных отливок хотя бы 1 отливка имела по пористости балл выше 3-го (определенный по методике ВИАМ согласно ГОСТ 1583-93), то этот вариант технологии также считался неэффективным.

Содержание неметаллических включений определяли на специально подготовленных образцах (из залитых проб) при помощи рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра



Рис. 1. «Кусты» готовых отливок «Крышка корпуса газоанализатора»

последовательного действия XRF-1800 (Shimadzu, Япония). По каждому варианту технологии плавки и заливки отрабатывали 3 серии. Таким образом, содержание неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) по конкретному варианту рассчитывали как среднее арифметическое из 96 проб.

Влияние температур перегрева и заливки расплава на чистоту поверхности, размерную точность и пористость отливок

Влияние температур перегрева ($T_{\text{пер}}$) и заливки ($T_{\text{зал}}$) расплава на качественные показатели отливок в ходе проведения нескольких серий производственной апробации показано в таблице.

Экспериментальные результаты показали (см. таблицу), что из 12 вариантов технологии плавки и заливки расплава эффективными являются варианты 5 и 8. Следует отметить, что варианты 2 и 7 по показателям размерной точности и чистоты поверхности отливок удовлетворяют необходимым требованиям, но не соответствуют по пористости. Это объясняется тем, что достаточно высокие температуры плавки и заливки положительно влияют на изменение уровня микрон неоднородности расплава [21, 23, 24], но приводят к повышенному содержанию неметаллических включений и не позволяют реализовать эффективные существующие способы рафинирования флюсами. Применяемая технология рафинирования расплава через стеклосетку ССФ-0,6 не обеспечивает необходимой очистки от неметаллических включений и газов, что и дает пористость выше 3-го балла.

Следует отметить, что в варианте 10, несмотря на удовлетворительные показатели по размерной точности и чистоте поверхности отливок, также наблюдается повышенная пористость исследуемых образцов. Очевидно, это связано с тем, что в этом режиме технологии применяется недостаточно высокая температура перегрева расплава, которая не позволяет нивелировать нежелательное влияние на качество литья повышенного количества используемых при плавке вторичных материалов.

Таким образом, наиболее рациональным вариантом в данных технологических условиях является вариант 8, при котором $T_{\text{пер}}$ составляет ~880÷890 °С, а $T_{\text{зал}}$ ~ 820÷830 °С. Вариант 5, при тех же положительных показателях качества литья, имеет большую температуру перегрева расплава по

Влияние температуры перегрева и заливки расплава на качество отливок (по 3 сериям каждого варианта технологии плавки и заливки)

Вариант	$T_{\text{пер}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{зал}}, ^\circ\text{C}$	Качественные показатели отливок		Пористость ²	Прожигаемость ¹	Заключение по технологии ³
			Чистота поверхности ¹	Размерная точность ¹			
1	990–1000	870–880	–	+	+	+	–
2		820–830	+	+	+	+	–
3		780–790	–	–	+	–	–
4	940–950	870–880	+	–	+	+	–
5		820–830	+	+	–	+	+
6		780–790	–	–	+	–	–
7	880–890	870–880	+	+	+	+	–
8		820–830	+	+	–	+	+
9		780–790	–	–	+	–	–
10	830–840	820–830	+	+	+	+	–
11		780–790	–	–	+	+	–
12	790–800	780–790	–	–	+	+	–

¹ «+» – удовлетворительная; «–» – неудовлетворительная
² «+» – есть; «–» – нет
³ «+» – эффективная; «–» – неэффективная

сравнению с вариантом 8, что экономически более затратно.

Влияние температуры перегрева и заливки расплава на содержание неметаллических включений в отливках

Известно [6, 9, 12, 21, 23, 24], что содержание неметаллических включений в алюминиевых сплавах сверх регламентированного количества может приводить к различным литейным дефектам и, соответственно, к браку литья (в основном, к пористости).

На рис. 2 представлены результаты исследования влияния температурных режимов плавки и заливки расплава на содержание неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) в исследуемых образцах из сплава АК7.

Полученные данные показывают (см. рис. 2), что из реализованных 12 вариантов, согласно таблице, технологии плавки и заливки расплава наиболее эффективными с точки зрения минимизации содержания неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) в сплаве АК7 также являются варианты 5 и 8, которые соответствуют $T_{\text{пер}} \sim 940\div 950\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{зал}} \sim 820\div 830\text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{\text{пер}} \sim 880\div 890\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{зал}} \sim 820\div 830\text{ }^\circ\text{C}$ и обеспечивают требуемое снижение уровня микронегодности, но не приводят к повышению

содержанию неметаллических включений. Это объясняется рациональными величинами температур перегрева и заливки расплава в литейную форму.

Следует отметить, что в настоящее время разработаны весьма эффективные способы рафинирования расплавов при получении алюминиевых отливок [22, 25–30]. Однако в случае литья по газифицируемыми моделям из-за высоких температур плавки и литья реализовать большинство этих способов не представляется возможным. Наибо-

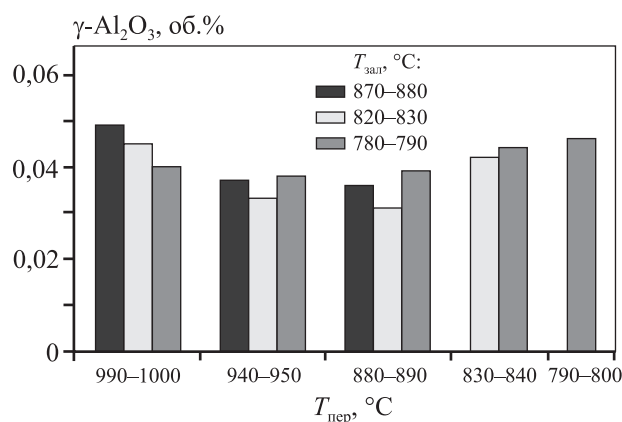


Рис. 2. Влияние температур перегрева и заливки расплава на содержание неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) в образцах из сплава АК7, полученных способом ЛГМ

лее целесообразным в данном случае в качестве надежной технологии рафинирования является использование фильтрации при заливке в литейную форму.

Также большую перспективу при получении качественных литых сплавов и изделий, кроме высокотемпературных перегревов, имеют другие различные способы воздействия на расплавы — как физические, так и технологические [31–37]. Развитие этих способов позволит заложить теоретические и технологические основы производства отливок с требуемыми структурой и свойствами.

Заключение

Показано, что при реализации технологии получения тонкостенных отливок из сплава АК7 литьем по газифицируемым моделям наиболее эффективными в рассматриваемых производственных условиях являются следующие режимы плавки и литья, обеспечивающие наилучшие качественные показатели герметичных отливок по размерной точности и чистоте поверхности: температура перегрева расплава — $880 \div 890$ °С, температура заливки в литейную форму — $820 \div 830$ °С. При этом исследованием влияния различных температурных режимов плавки и заливки расплава (состава АК7) при ЛГМ на содержание неметаллических включений в литом состоянии установлено, что минимальное содержание $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в готовом сплаве обеспечивают: температура перегрева расплава — до $880 \div 890$ или $940 \div 950$ °С, температура заливки в литейную форму — $820 \div 830$ °С.

Работа выполнена в рамках государственной работы «Организация проведения научных исследований» государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2017–2019 гг. (задание № 11.5684.2017/ВУ).

Литература

1. *Nesterov N.V., Ermilov A.G.* Low-frequency pulsation of melt during lost foam casting process: Part 2 // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2012. Vol. 53. No. 2. P. 150–154.
2. *Zhang L., Tan W., Hu H.* Determination of the heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface of lost foam casting process // *Heat and Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. Iss. 6. P. 1131–1138.
3. *Тухомирова И.М., Клименок Е.В.* Разработка технологии изготовления отливки литьем по газифицируемым моделям // *Литье и металлургия.* 2013. No. 3S (72). С. 132–137.
4. *Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Laurent C., Твердохлебов Н.И., Щербакова Е.П.* Совершенствование литья по газифицируемым моделям // *Литейн. пр-во.* 2014. No. 4. С. 16–18.
5. *Guler K.A., Kisasoz A., Karaaslan A.* A study of expanded polyethylene (EPE) pattern application in aluminium lost foam casting // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 2. P. 171–176.
6. *Griffiths W.D., Ainsworth M.J.* Hydrogen pick-up during mould filling in the lost foam casting of Al alloys // *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47. Iss. 1. P. 145–150.
7. *Jiang W., Li G., Fan Z., Wang L., Liu F.* Investigation on the interface characteristics of Al/Mg bimetallic castings processed by lost foam casting // *Metall. Mater. Trans. A.* 2016. Vol. 47. Iss. 5. P. 2462–2470.
8. *Griffiths W.D., Ainsworth M.J.* Instability of the liquid metal–pattern interface in the lost foam casting of aluminum alloys // *Metall. Mater. Trans. A.* 2016. Vol. 47. Iss. 6. P. 3137–3149.
9. *Barone M., Caulk D.* Analysis of mold filling in lost foam casting of aluminum: Method // *Int. J. Metalcasting.* 2008. Vol. 2. Iss. 3. P. 29–45.
10. *Wali K.F., Bhavnani S.H., Overfelt R.A., Sheldon D.S., Williams K.* Investigation of the performance of an expandable polystyrene injector for use in the lost-foam casting process // *Metall. Mater. Trans. B.* 2003. Vol. 34. Iss. 6. P. 843–851.
11. *Karimian M., Ourdjini A., Idris M.H., Jafari H.* Effects of casting parameters on shape replication and surface roughness of LM6 aluminium alloy cast using lost foam process // *Trans. Indian Inst. Met.* 2015. Vol. 68. Iss. 2. P. 211–217.
12. *Guler K.A., Kisasoz A., Karaaslan A.* Effects of pattern coating and vacuum assistance on porosity of aluminium lost foam castings // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. No. 5. P. 424–428.
13. *Deev V.B., Ponomareva K.V., Yudin A.S.* Investigation into the density of polystyrene foam models when implementing the resource saving fabrication technology // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 3. P. 283–286.
14. *Pacyniak T.* Effect of refractory coating in the lost foam process // *Arch. Foundry Eng.* 2009. No. 9 (3). P. 255–260.
15. *Sharifi A., Mansouri Hasan Abadi M., Ashiri R.* Direct observation of effects of foam density, gating design and pouring temperature on mold filling process in lost foam casting of A356 alloy // *Conference: Proc. TMS Middle East — Mediterranean materials Congress on energy and infrastructure systems, MEMA.* 2015. P. 109–118.
16. *Dispınar D., Campbell J.* Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings // *Mater. Sci. Eng.* 2011. Vol. 528. No. 10. P. 3860–3865.
17. *Sands M., Shivkumar S.* EPS bead fusion effects on fold defect formation in lost foam casting of aluminum alloys // *J. Mater. Sci.* 2006. Vol. 41. No. 8. P. 2373–2379.

18. *Tabibian S., Charkaluk E., Constantinescu A., Szymka F.* Behavior, damage and fatigue life assessment of lost foam casting aluminum alloys under thermo-mechanical fatigue conditions // *Procedia Eng.* 2010. Vol. 2. No. 1. P. 1145–1154.
19. *Pacyniak T.* The effect of refractory coating permeability on the Lost Foam Process // *Arch. Foundry Eng.* 2008. Vol. 8. No. 3. P. 199–204.
20. *Griffiths W.D., Davies P.J.* The permeability of Lost Foam pattern coatings for Al alloy castings // *J. Mater. Sci.* 2008. Vol. 43. No. 16. P. 5441–5447.
21. *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. Iss. 11–12. P. 1123–1127.
22. *Kolonakov A.A., Kukharensko A.V., Deev V.B., Abaturova A.A.* Structure and chemical composition of the AK12MMgN piston alloy fabricated based on various charges // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 4. P. 428–433.
23. *Deev V.B., Selyanin I.F., Ponomareva K.V., Yudin A.S., Tsetsorina S.A.* Fast cooling of aluminum alloys in casting with a gasifying core // *Steel Transl.* 2014. Vol. 44. No. 4. P. 253–254.
24. *Никитин В.И., Никитин К.В.* Наследственность в литых сплавах. М.: Машиностроение-1, 2005.
25. *Selyanin I.F., Deev V.B., Kukharensko A.V.* Resource-saving and environment-saving production technologies of secondary aluminum alloys // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 3. P. 272–276.
26. *Бранчуков Д.Н., Панфилов А.В.* О новых комбинированных флюсах для рафинирования алюминиевых сплавов // *Литейн. пр-во.* 2009. No. 1. С. 2–5.
27. *Тен Э.Б., Рахуба Е.М., Киманов Б.М., Жолдубаева Ж.Д.* Ресурсы повышения рафинирующего потенциала фильтров для жидких металлов // *Литейщик России.* 2013. No. 11. С. 38–42.
28. *Румянцев Г.А., Немененок Б.М., Задружный С.П., Муравичский А.М.* Повышение экологической безопасности силуминов за счет использования низкотоксичных флюсов и препаратов // *Литье и металлургия.* 2010. No. 4 (58). С. 77–82.
29. *Садох А.А., Волочко А.Т.* Рафинирование алюминиевых сплавов инертными газами // *Литье и металлургия.* 2012. No. 3 (69). С. 69–71.
30. *Грачев А.Н., Леушин И.О., Маслов К.А., Леушина Л.И.* Применение шлама соляных закалочных ванн для рафинирования алюминиевых сплавов // *Цвет. металлы.* 2015. No. 11 (875). С. 76–79.
31. *Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Glushchenkov V.A., 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. Iss. 3. P. 202–210.
32. *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. Iss. 6. P. 599–605.
33. *Prusov E.S., Panfilov A.A.* Properties of cast aluminum-based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases // *Russ. Metall.* 2011. No. 7. P. 670–674.
34. *Prusov E.S., Panfilov A.A.* Influence of repeated remeltings on formation of structure of castings from aluminium matrix composite alloys // *Metal 2013: Proc. 22-nd Int. conf. on metallurgy and materials.* 2013. No. 1. P. 1152–1156.
35. *Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Popova N.A., Kononov S.V.* Fatigue life of silumin treated with a high-intensity pulsed electron beam // *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2015. Vol. 9. Iss. 5. P. 1056–1059.
36. *Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Kononov S.V., Semina O.A.* Evolution of Al–19,4Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue. // *Mater. Sci. Technol. (UK).* 2015. Vol. 31. Iss. 13a. P. 1523–1529.
37. *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.

References

1. *Nesterov N.V., Ermilov A.G.* Low-frequency pulsation of melt during lost foam casting process: Part 2. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2012. Vol. 53. No. 2. P. 150–154.
2. *Zhang L., Tan W., Hu H.* Determination of the heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface of lost foam casting process. *Heat and Mass Transfer.* 2016. Vol. 52. Iss. 6. P. 1131–1138.
3. *Tikhomirova M.I., Klimenok E.V.* Razrabotka tekhnologii izgotovleniya otlivki lit'iem po gazifitsiruemykh modelyam [The development of manufacturing technology of castings by casting on gasified models]. *Lit'ye i metallurgiya.* 2013. No. 3S (72). P. 132–137.
4. *Isagulov A.Z., Kulikov V.Yu., Laurent C., Tverdokhlebov N.I., Shcherbakova E.P.* Sovershenstvovanie lit'ya po gazifitsiruemykh modelyam [The improvement of casting on gasified models]. *Liteinoe proizvodstvo.* 2014. No. 4. P. 16–18.
5. *Guler K.A., Kisasoz A., Karaaslan A.* A study of expanded polyethylene (EPE) pattern application in aluminium lost foam casting. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 2. P. 171–176.
6. *Griffiths W.D., Ainsworth M.J.* Hydrogen pick-up during mould filling in the lost foam casting of Al alloys. *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47. Iss. 1. P. 145–150.
7. *Jiang W., Li G., Fan Z., Wang L., Liu F.* Investigation on the interface characteristics of Al/Mg bimetallic castings processed by lost foam casting. *Metall. Mater. Trans. A.* 2016. Vol. 47. Iss. 5. P. 2462–2470.
8. *Griffiths W.D., Ainsworth M.J.* Instability of the liquid metal–pattern interface in the lost foam casting of aluminum alloys. *Metall. Mater. Trans. A.* 2016. Vol. 47. Iss. 6. P. 3137–3149.

9. Barone M., Caulk D. Analysis of Mold Filling in Lost Foam Casting of Aluminum: Method. *Int. J. Metalcasting*. 2008. Vol. 2. Iss. 3. P. 29–45.
10. Wali K.F., Bhavnani S.H., Overfelt R.A., Sheldon D.S., Williams K. Investigation of the performance of an expandable polystyrene injector for use in the lost-foam casting process. *Metall. Mater. Trans. B*. 2003. Vol. 34. Iss. 6. P. 843–851.
11. Karimian M., Ourdjini A., Idris M.H., Jafari H. Effects of casting parameters on shape replication and surface roughness of LM6 aluminium alloy cast using lost foam process. *Trans. Indian Inst. Met.* 2015. Vol. 68. Iss. 2. P. 211–217.
12. Guler K.A., Kisasoz A., Karaaslan A. Effects of pattern coating and vacuum assistance on porosity of aluminium lost foam castings. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2014. Vol. 55. No. 5. P. 424–428.
13. Deev V.B., Ponomareva K.V., Yudin A.S. Investigation into the density of polystyrene foam models when implementing the resource saving fabrication technology. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 3. P. 283–286.
14. Pacyniak T. Effect of refractory coating in the lost foam process. *Arch. Foundry Eng.* 2009. No. 9 (3). P. 255–260.
15. Sharifi A., Mansouri Hasan Abadi M., Ashiri R. Direct observation of effects of foam density, gating design and pouring temperature on mold filling process in lost foam casting of A356 alloy. In: *Conference: Proc. TMS Middle East — Mediterranean materials Congress on energy and infrastructure systems, MEMA*. 2015. P. 109–118.
16. Dispinar D., Campbell J. Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings. *Mater. Sci. Eng.* 2011. Vol. 528. No. 10. P. 3860–3865.
17. Sands M., Shivkumar S. EPS bead fusion effects on fold defect formation in lost foam casting of aluminum alloys. *J. Mater. Sci.* 2006. Vol. 41. No. 8. P. 2373–2379.
18. Tabibian S., Charkaluk E., Constantinescu A., Szymtka F. Behavior, damage and fatigue life assessment of lost foam casting aluminum alloys under thermo-mechanical fatigue conditions. *Procedia Eng.* 2010. Vol. 2. No. 1. P. 1145–1154.
19. Pacyniak T. The effect of refractory coating permeability on the Lost Foam Process. *Arch. Foundry Eng.* 2008. Vol. 8. No. 3. P. 199–204.
20. Griffiths W.D., Davies P.J. The permeability of Lost Foam pattern coatings for Al alloy castings. *J. Mater. Sci.* 2008. Vol. 43. No. 16. P. 5441–5447.
21. 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. Iss. 11–12. P. 1123–1127.
22. Kolonakov A.A., Kukhareno A.V., Deev V.B., Abaturova A.A. Structure and chemical composition of the AK12MMgN piston alloy fabricated based on various charges. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 4. P. 428–433.
23. Deev V.B., Selyanin I.F., Ponomareva K.V., Yudin A.S., Tsetso-rina S.A. Fast cooling of aluminum alloys in casting with a gasifying core. *Steel Transl.* 2014. Vol. 44. No. 4. P. 253–254.
24. Nikitin V.I., Nikitin K.V. Nasledstvennost' v litykh splavakh [Heredity in cast alloys]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005.
25. Selyanin I.F., Deev V.B., Kukhareno A.V. Resource-saving and environment-saving production technologies of secondary aluminum alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. Iss. 3. P. 272–276.
26. Branchukov D.N., Panfilov A.V. O novykh kombinirovannykh flyusakh dlya rafinirovaniya alyuminiyevykh splavov [About new combined fluxes for refining aluminum alloys]. *Liteinoe proizvodstvo*. 2009. No. 1. P. 2–5.
27. Ten E.B., Rakhuba E.M., Kimanov B.M., Zholdubayeva Zh.D. Resursy povysheniya rafinirovushchego potentsiala fil'trov dlya zhidkikh metallov [Resources increase refining capacity of filters for liquid metal]. *Liteishchik Rossii*. 2013. No. 11. P. 38–42.
28. Rumyantseva G.A., Nemenenok B.M., Zadrutskii S.P., Muravitskii A.M. Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti siluminov za schet ispol'zovaniya nizkotoksichnykh flyusov i preparatov [Increasing ecological safety Silumins through the use of low-toxicity products and fluxes]. *Lit'ye i metallurgiya*. 2010. No. 4 (58). P. 77–82.
29. Sadokha M.A., Volochko A.T. Rafinirovanie alyuminiyevykh splavov inertnymi gazami [Refining aluminum alloys by inert gases]. *Lit'ye i metallurgiya*. 2012. No. 3 (69). P. 69–71.
30. Grachev A.N., Leushin I.O., Maslov K.A., Leushina L.I. Primenenie shlama solyanykh zakalochnykh vann dlya rafinirovaniya alyuminiyevykh splavov [Application of of sludge the salt of quenching bath for the refining of aluminum alloys]. *Tsvetnye metally*. 2015. No. 11 (875). P. 76–79.
31. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu., Glushchenkov V.A., 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. Iss. 3. P. 202–210.
32. 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. Iss. 6. P. 599–605.
33. Prusov E.S., Panfilov A.A. Properties of cast aluminum-based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases. *Russ. Metall.* 2011. No. 7. P. 670–674.
34. Prusov E.S., Panfilov A.A. Influence of repeated remeltings on formation of structure of castings from aluminium matrix composite alloys. In: *Metal 2013: Proc. 22-nd Int. conf. on metallurgy and materials*. 2013. No. 1. P. 1152–1156.
35. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Popova N.A., Kononov S.V. Fatigue life of silumin treated with a high-intensity pulsed electron beam. *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. Vol. 9. Iss. 5. P. 1056–1059.
36. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Kononov S.V., Semina O.A. Evolution of Al–19,4Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue. *Mater. Sci. Technol. (UK)*. 2015. Vol. 31. Iss. 13a. P. 1523–1529.
37. 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.