

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПЛАВКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

© 2017 г. **В.Б. Деев, К.В. Пономарева, А.И. Куценко, 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 31.10.16 г., подписана в печать 14.11.16 г.*

Развитие современного литейного производства характеризуется постоянным повышением требований к качеству выпускаемого литья и рациональному использованию материальных ресурсов, что обуславливает поиск новых технических и технологических решений, позволяющих обеспечить наряду с ресурсосбережением получение требуемых свойств литых изделий. При этом вопросы выявления и исследования закономерностей влияния температурно-временных параметров плавки и заливки в литейную форму алюминиевых сплавов при литье по газифицируемым моделям на герметичность, механические и качественные показатели тонкостенных отливок остаются малоизученными и сложными для реализации, особенно с учетом проведения ресурсосберегающих мероприятий. В данной работе рассмотрено влияние технологических параметров плавки на прочность, герметичность и содержание неметаллических включений в отливках крышки корпуса газоанализатора из сплава АК7 при литье по газифицируемым моделям. Полученный на основе экспериментальных исследований массив данных был подвергнут статистической обработке. Использование статистических моделей позволило получить результаты влияния времени выдержки расплава и содержания вторичных материалов в шихте на прочность и герметичность указанных отливок. Результаты изучения влияния длительности выдержки расплава АК7 при температуре перегрева 880–890 °С на содержание неметаллических включений в отливках показали, что его можно регулировать, варьируя время выдержки. Это уменьшает микронеоднородность расплава и обеспечивает получение большего количества отливок с минимальным содержанием неметаллических включений.

**Ключевые слова:** отливка, алюминиевый сплав, перегрев расплава, газифицируемые модели, прочность, герметичность, расплав, время выдержки, вторичные материалы, неметаллические включения.

**Деев В.Б.** – докт. техн. наук, профессор кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов, гл. науч. сотрудник 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.

**Куценко А.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры экономической теории и предпринимательской деятельности СибГИУ. E-mail: aik\_mail@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: smetanyuk.sv@mail.ru.

**Для цитирования:** Деев В.Б., Пономарева К.В., Куценко А.И., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние условий плавки алюминиевых сплавов на свойства и качество отливок, полученных по газифицируемым моделям // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 4. С. 39–45. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-39-45.

*Deev V.B., Ponomareva K.V., Kutsenko A.I., Prikhodko O.G., Smetanyuk S.V.*

### **Influence of melting conditions of aluminum alloys on the properties and quality of castings obtained by lost foam casting**

The development of modern foundry is characterized by a constant increase of requirements to the quality of the casting, the rational use of material resources, the search for new technical and technological solutions to ensure resource conservation along with obtaining the desired properties of castings. At the same time questions to identify and study the impact of the laws of temperature and time parameters of melting and pouring into the mold of aluminum alloys during lost foam casting on integrity, mechanical and quality parameters of thin-walled castings are poorly understood and difficult to implement, especially in view of resource saving measures. This article examines the influence of casting process parameters on strength, integrity and content of nonmetallic inclusions in AK7

alloy castings of the gas analyzer housing cover obtained by lost-foam casting. The dataset obtained on the basis of experimental research was subjected to statistical analysis. Statistical models allowed us to obtain the effect of time of melt holding and the content of recycled materials in the charge on strength and integrity of the specified castings. The effect of the time of AK7 melt holding at 880–890 °C on the content of nonmetallic inclusions in the castings was studied, and it was shown that the holding time variation allows controlling the nonmetallic content. This reduces melt microinhomogeneity and provides more castings with the minimum content of nonmetallic inclusions.

**Keywords:** casting, aluminum alloy, melt overheating, lost patterns, strength, integrity, melt, holding time, recycled materials, non-metallic inclusions.

**Deev V.B.** – Dr. Sci. (Tech), Prof., Department of foundry technologies and art processing materials, Chief scientific officer, 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, Department of material science, foundry and welding production, Siberian State Industrial University (SibSIU) (654007, Russia, Novokuznetsk, Kirov str., 42). E-mail: kiraponomareva525@mail.ru.

**Kutsenko A.I.** – Cand. Sci. (Tech.), Lecturer, Department of economics and business activities, SibSIU. E-mail: aik\_mail@mail.ru.

**Prikhodko O.G.** – Cand. Sci. (Tech.), Lecturer, Department of quality management, SibSIU. E-mail: prihodko\_og@rambler.ru.

**Smetanyuk S.V.** – Leading engineer, LLC «Metal NVK» (654063, Russia, Novokuznetsk, Rudokoprovaya str., 4). E-mail: smetanyuk.sv@mail.ru.

**Citation:** Deev V.B., Ponomareva K.V., Kutsenko A.I., Prikhodko O.G., Smetanyuk S.V. Vliyanie uslovii plavki alyuminievyykh splavov na svoystva i kachestvo otlivok, poluchennykh po gazifitsiruemyim modelyam. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 4. P. 39–45. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-4-39-45.

## Введение

Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) в настоящее время является одним из эффективных и перспективных способов получения высококачественных тонкостенных отливок, обладающих заданной размерной точностью, требуемой чистотой поверхности и другими полезными свойствами [1–7]. Все более широкое распространение данная технология находит при изготовлении алюминиевых изделий [8–23].

Снижение себестоимости производства литых изделий возможно только при использовании ресурсосберегающих технологий. Так, для алюминиевого литья способом ЛГМ используется повышенное количество вторичных материалов в шихте. Между тем их преобладание в шихте даже при стабильном течении технологического процесса ЛГМ может приводить к пористости, спаям и другим видам литейных дефектов и брака, что значительно снижает механические и эксплуатационные свойства отливок.

Технология плавки в этом случае должна включать эффективные приемы обработки расплава, например такие, как термовременная обработка по оптимальным температурным режимам и рафинирование [24–28], а также возможность обеспечения оптимальной температуры заливки в литейные формы. К сожалению, эти мероприятия и факторы определяются индивидуально в каждом конкретном случае и зависят от типа производства,

правильного агрегата, марки получаемого сплава, габаритов и массы будущей отливки, «сложности» литейной формы и др. Следует признать, что в результате всего перечисленного процесс получения изделий требуемого качества усложняется с инженерной точки зрения. Тем не менее, разработка эффективной технологии плавки алюминиевых сплавов при ЛГМ является целесообразной.

Следует отметить, что перспективу имеют и другие способы обработки расплава при плавке и кристаллизации, которые могут использоваться с учетом возможностей производства и применяемого способа литья [29–34].

Ранее [4, 35] было показано влияние температур перегрева ( $t_{\text{пер}}$ ) и заливки ( $t_{\text{зал}}$ ) расплава на качественные показатели отливок, в том числе из сплава АК7, изготовленных по технологии ЛГМ, и были рекомендованы оптимальные значения величины перегрева. Существенное влияние на качество отливок может оказывать не только величина  $t_{\text{пер}}$  расплава, но и время выдержки ( $t$ ) при этой температуре.

В данной работе приведены результаты исследования влияния продолжительности выдержки расплава состава АК7 (при оптимальных значениях  $t_{\text{пер}} = 880 \div 890$  °C и  $t_{\text{зал}} = 820 \div 830$  °C) на прочность, герметичность и содержание неметаллических включений ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) в отливках, полученных способом ЛГМ в условиях ООО «НПП Вектор Ма-

шиностроения» (г. Новокузнецк). При этом состав шихты включал повышенное количество вторичных материалов.

## Методика проведения эксперимента

Объектом исследования был промышленный алюминиевый сплав АК7 состава, мас. %: 6—8 Si; 0,2—0,6 Mn; 0,2—0,5 Mg; до 1,5 Cu; до 0,3 Ni; до 0,5 Zn; до 1,3 Fe; ост. — Al (ГОСТ 1583-93). Для его приготовления использовали чушковый сплав АК7 и вторичное сырье из этого же сплава — лом деталей, отходы литейного и механического цехов. Вторичные материалы во всех экспериментах содержали 50—55 об. % мелкого лома и отходов сплавов и 45—50 об. % брикетированной стружки. Все отходы были предварительно очищены и обработаны в соответствии со стандартными требованиями.

Экспериментальные плавки проводили в производственных условиях в печи ИСТ-0,06. В ходе процесса варьировали время выдержки расплава при температуре перегрева  $t_{пер} = 880 \div 890$  °С. Заливку в литейные формы осуществляли при  $t_{зал} = 820 \div 830$  °С через фильтровальную стеклосетку ССФ-0,6.

Для формовки применяли кварцевый песок  $2K_1O_3O_2$ , для изготовления газифицируемых моделей — полистирол фирмы «Styrochem» (Канада). Для вспенивания полистирола и получения моделей использовали автоклав ГК-100-3М. Готовые пенополистироловые модели обрабатывали покрытием Polytor AL2. Модельные блоки помещали вертикально в подвешенном состоянии в опоку размером  $700 \times 700 \times 700$  мм. Засыпку песка в опоку проводили одновременно с ее вибрацией ( $f \sim 36$  Гц), которую осуществляли посредством закрепленных на ней 2 электрических вибраторов ( $v = 3000$  об/мин). Затем опоку накрывали пленкой, размещали заливочное устройство, вакуумировали литейную форму и производили заливку расплава. После охлаждения осуществляли выбивку отливок, опиловку и пескоструйную зачистку. Исследования в работе проводили на тонкостенных отливках крышки корпуса газоанализатора [4], входящих в номенклатуру ООО «НПП Вектор Машиностроения».

Контроль химического состава сплавов и содержания неметаллических включений осуществляли на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре последовательного действия XRF-1800 («Shimadzu», Япония).

Механические свойства и пористость опреде-

ляли на стандартных образцах, полученных ЛГМ, согласно ГОСТ 1583-93. Герметичность исследовали по критерию пневмопрочности на специальной установке [24] на пробах-стаканчиках с толщиной стенки 4 мм, изготовленных способом ЛГМ.

Полученные результаты обрабатывались с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Excel и STATISTICA 6.0 и SPSS 13.0, а также с помощью специально разработанного в среде визуального программирования Delphi 2007 for Win32 incl UPDATE 1 программного приложения.

## Результаты и их обсуждение

На основе полученных экспериментальных данных о влиянии времени выдержки расплава ( $\tau$ ) и содержания вторичных материалов в составе шихты ( $C_{вт}$ , %) на прочность ( $\sigma_B$ ) и герметичность ( $\Gamma$ ) (по критерию пневмопрочности) отливок крышки корпуса газоанализатора, изготовленных способом ЛГМ, была проведена статистическая обработка выявленных зависимостей с целью математического описания наблюдаемых явлений.

Адекватность полученных регрессионных моделей оценивалась по критерию Фишера ( $F_p$  — ошибка 5 %,  $F_{таб} = 3,49$ ). Для каждого регрессионного уравнения дополнительно приведены: уровень значимости ( $p$ ), величина достоверности аппроксимации  $R^2$ , интервалы изменения зависимых переменных, для которых получено данное выражение.

Изменения прочности ( $\sigma_B$ ) и герметичности ( $\Gamma$ ) сплава в зависимости от времени выдержки расплава в печи ( $\tau$ ) и состава шихты ( $C_{вт}$ ) описываются регрессионными уравнением в виде полинома 2-й степени:

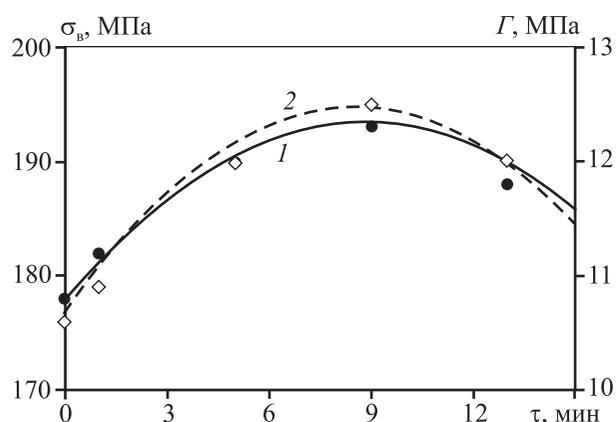
$$\sigma_B = 192,99484 + 3,55098\tau - 0,20094\tau^2 - 0,42970C_{вт} - 0,00250C_{вт}^2 \quad (1)$$

$$(F_p = 45,3; p = 0,01; R^2 = 0,941; 0 \leq \tau \leq 15; 0 \leq C_{вт} \leq 80),$$

$$\Gamma = 11,90527 + 0,42071\tau - 0,02466\tau^2 - 0,03007C_{вт} - 0,00011C_{вт}^2 \quad (2)$$

$$(F_p = 75,8; p = 0,01; R^2 = 0,903; 0 \leq \tau \leq 15; 0 \leq C_{вт} \leq 80).$$

На рис. 1 приведены расчетные по уравнениям (1) и (2) и экспериментальные данные по определению свойств отливок при различном времени

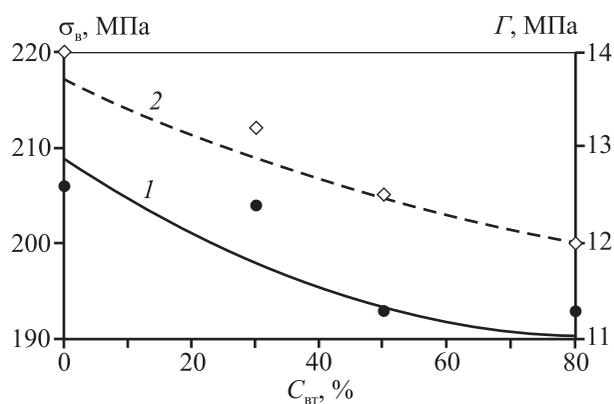


**Рис. 1.** Влияние времени выдержки расплава на прочность (1) и герметичность (2) отливок крышки корпуса газоанализатора при содержании в шихте 50 % чушковых и 50 % вторичных материалов  
Точки — эксперимент, кривые — расчет по формулам (1) и (2)

выдержки расплава в печи, полученных при содержании в шихте 50 % чушковых и 50 % вторичных материалов, температурах перегрева  $880\text{--}890\text{ }^\circ\text{C}$  и заливки расплава в литейную форму  $820\text{--}830\text{ }^\circ\text{C}$ . Видно, что при времени выдержки расплава в печи около 8–10 мин прочность и герметичность отливок имеют точку перегиба регрессионной кривой — точку максимума изучаемых параметров, что может быть объяснено равномерной мелкозернистой структурой отливок и связано с более однородным состоянием расплава перед кристаллизацией. Величина  $\tau < 5$  мин не оказывает значительного влияния на уровень прочности и герметичности отливок, а  $\tau > 12$  мин — приводит к повышенному содержанию газов в расплаве, что способствует образованию пористости при кристаллизации и снижению прочности и герметичности отливок.

На рис. 2 приведены расчетные и экспериментальные данные при различном содержании чушковых и вторичных материалов в шихте, полученные при  $\tau = 8\text{--}10$  мин,  $t_{\text{пер}} = 880\text{--}890\text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{\text{зал}} = 820\text{--}830\text{ }^\circ\text{C}$ . Увеличение содержания вторичных материалов в шихте обуславливает нелинейное снижение прочности и герметичности сплава в отливке. Причем повышение  $C_{\text{вт}}$  от 0 до 50 % приводит к падению величины  $\sigma_B$  на 15–16 МПа, а при дальнейшем увеличении их доли от 50 до 80 % прочность возрастает лишь на 2–3 МПа. Аналогичная картина наблюдается и для герметичности: 1–2 и 0,5–1,0 МПа соответственно.

Таким образом, при технологическом режиме, обеспечивающем длительность выдержки расплава



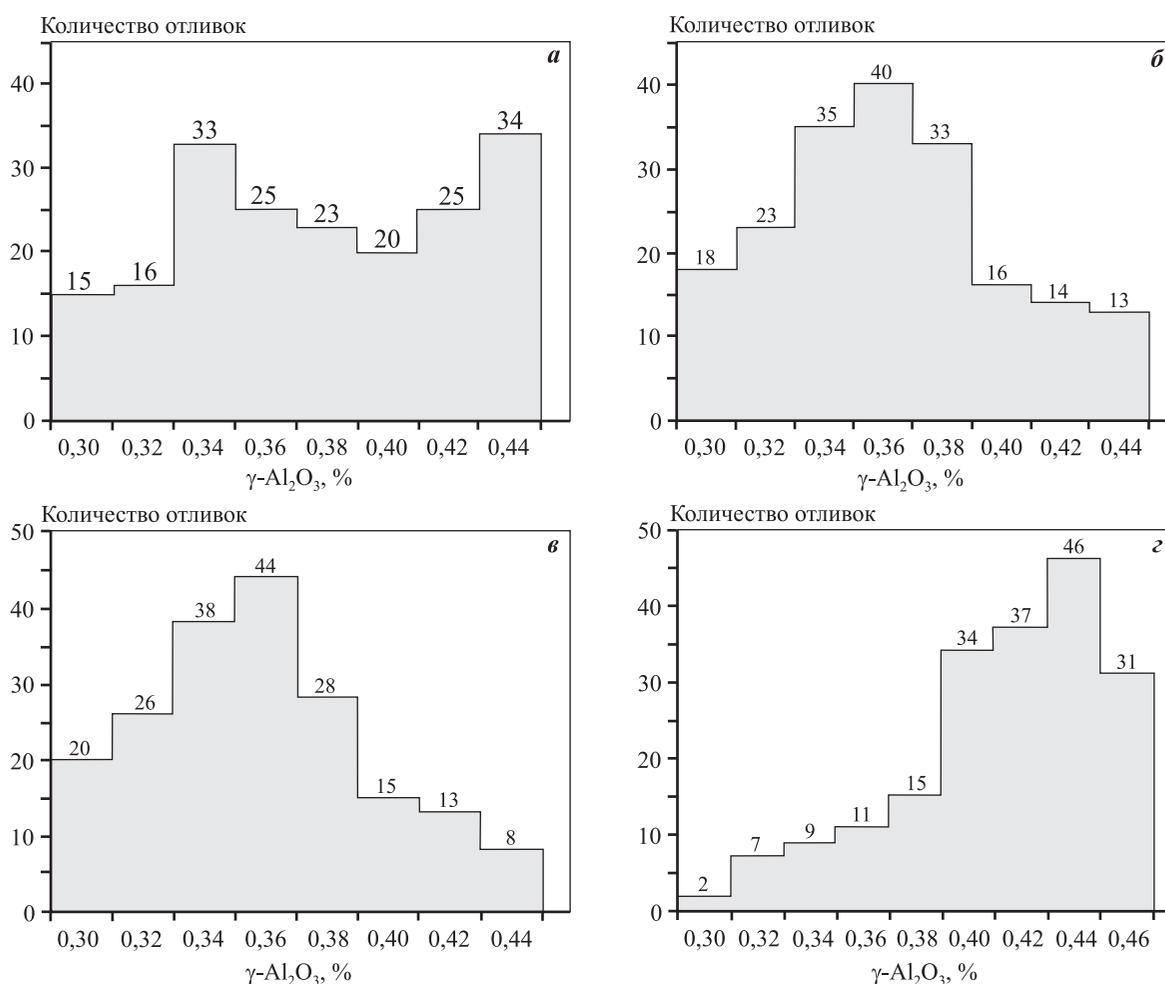
**Рис. 2.** Влияние содержания вторичных материалов в шихте на прочность (1) и герметичность (2) отливок крышки корпуса газоанализатора при времени выдержки расплава в печи 8–10 мин  
Точки — эксперимент, кривые — расчет по формулам (1) и (2)

ва в печи около 8–10 мин, увеличение содержания вторичных материалов в шихте с 50 до 80 % не приводит к резкому снижению прочности и герметичности отливок и повышению доли брака по вине металла.

На рис. 3 представлены результаты исследования содержания неметаллических включений в отливках крышки корпуса газоанализатора (всего 192 шт.: 6 серий по 32 отливки в каждом варианте) в зависимости от времени выдержки при температуре перегрева  $t_{\text{пер}} = 880\text{--}890\text{ }^\circ\text{C}$  и содержании в шихте 50–55 % вторичных материалов. Анализ приведенных данных показывает, что изменение продолжительности выдержки при перегреве позволяет регулировать содержание неметаллических включений в отливках. Оптимальным временем выдержки расплава является длительность перегрева 5–10 мин, в течение которого уменьшается микронеоднородность расплава и получается большее количество отливок с минимальным содержанием неметаллических включений ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ).

Из рис. 3, а следует, что время выдержки 0–1 мин является недостаточным для уменьшения доли неметаллических включений в отливках: получено весьма высокое количество отливок с  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \geq 0,40\text{ }%$ . Данные результаты объясняются тем, что содержание вторичных материалов в шихте более 50 % требует достаточной выдержки расплава при температуре перегрева  $t_{\text{пер}} = 880\text{--}890\text{ }^\circ\text{C}$  с целью уменьшения уровня микронеоднородности расплава.

Также следует обратить внимание, что длительность



**Рис. 3.** Содержание неметаллических включений ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) в отливках крышки корпуса газоанализатора, полученных способом ЛГМ при  $t_{\text{пер}} = 880\div 890$  °С и различном времени выдержки расплава  
 а –  $\tau = 0+1$  мин; б –  $4+5$  мин; в –  $8+10$  мин; з –  $12+13$  мин

ность 12–13 мин (см. рис. 3, з) является чрезмерной и приводит к существенному газопоглощению расплава и повышенному содержанию неметаллических и газовых включений как в жидком, так и в твердом состояниях сплава.

## Заключение

Показано, что при использовании в шихте повышенного количества вторичных материалов (~50÷80 %) температурно-временные параметры плавки алюминиевых сплавов ( $t_{\text{пер}} = 880\div 890$  °С при  $\tau = 8+10$  мин) и заливки ( $t_{\text{зал}} = 820\div 830$  °С) в литейную форму обеспечивают минимальное содержание неметаллических включений ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) и требуемые показатели прочности и герметичности у тонкостенных отливок из сплава АК7, полученных способом ЛГМ. Выведены аналитические зависимости, связывающие прочность и герметич-

ность отливок с выдержкой расплава в плавильном агрегате и количеством вторичных материалов в шихте.

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

## Литература/References

1. 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. No. 5. P. 2462–2470.
2. Тихомирова И.М., Клименок Е.В. Разработка технологии изготовления отливки литьем по газифицируемым моделям // *Литье и металлургия*. 2013. No. 3S (72). С. 132–137; Tikhomirova M.I., Klimenok E.V.

- Razработка technologii izgotovleniya otlivki litem po gazificiruemym modelyam [The development of manufacturing technology of castings by casting on gasified models]. *Litye i metallurgiya*. 2013. No. 3S (72). P. 132–137.
3. 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.
  4. Деев В.Б., Пономарева К.В., Юдин А.С. Исследование плотности пенополистироловых моделей при реализации ресурсосберегающей технологии получения тонкостенного алюминиевого литья // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 2. С. 48–51; 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.
  5. Нестеров Н.В., Ермилов А.Г. Низкочастотные пульсации расплава при литье по газифицируемым моделям. Ч. 1 // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2011. No. 6. С. 43–47; Nesterov N.V., Ermilov A.G. Low-frequency pulsation of melt during lost foam casting process. Pt. 1. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2011. Vol. 52. No. 6. P. 499–503.
  6. Нестеров Н.В., Ермилов А.Г. Низкочастотные пульсации расплава при литье по газифицируемым моделям. Ч. 2 // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2012. No. 2. С. 42–46; Nesterov N.V., Ermilov A.G. Low-frequency pulsation of melt during lost foam casting process. Pt. 2. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2012. Vol. 53. No. 2. P. 150–154.
  7. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Laurent C., Твердохлебов Н.И., Щербакова Е.П. Совершенствование литья по газифицируемым моделям // Литейное пр-во. 2014. No. 4. С. 16–18; Isagulov A.Z., Kulikov V.Y., Laurent C., Tverdokhlebov N.I., Shcherbakova E.P. Sovershenstvovanie litya po gazificiruemym modelyam [The improvement of casting on gasified models]. *Liteynoe proizvodstvo*. 2014. No. 4. P. 16–18.
  8. 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. No. 1. P. 145–150.
  9. 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. of Metals*. 2015. Vol. 68. No. 2. P. 211–217.
  10. Griffiths W.D., Ainsworth M.J. Instability of the liquid metal–pattern interface in the lost foam casting of aluminum alloys. *Metal. Mater. Trans. A*. 2016. Vol. 47. No. 6. P. 3137–3149.
  11. 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. No. 6. P. 1131–1138.
  12. Barone M., Caulk D. Analysis of mold filling in lost foam casting of aluminum: method. *Int. J. Metalcasting*. 2008. Vol. 2. No. 3. P. 29–45.
  13. 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. No. 6. P. 843–851.
  14. 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.
  15. Pacyniak T. Effect of refractory coating in the Lost Foam Process. *Arch. Foundry Eng.* 2009. No. 9(3). P. 255–260.
  16. 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: *Proceedings of the TMS middle east – mediterranean materials congress on energy and infrastructure systems*. MEMA. 2015. P. 109–118.
  17. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Кухаренко А.В. Ресурсо- и экологосберегающие технологии производства вторичных алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 2. С. 20–25; 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. No. 3. P. 272–276.
  18. Dispinar D., Campbell J. Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings. *Mater. Sci. Eng.* 2011. No. 528(10). P. 3860–3865.
  19. Griffiths W.D., Ainsworth M.J. Instability of the liquid metal–pattern interface in the lost foam casting of aluminum alloys. *Metal. Mater. Trans. A*. 2016. Vol. 47A. P. 3137–3149.
  20. Sands M., Shivkumar S. EPS bead fusion effects on fold defect formation in lost foam casting of aluminum alloys. *J. Mater. Sci.* 2006. No. 41(8). P. 2373–2379.
  21. Tabibian S., Charkaluk E., Constantinescu A., Szmytka F. Behavior, damage and fatigue life assessment of lost foam casting aluminum alloys under thermo-mechanical fatigue conditions. *Proc. Eng.* 2010. No. 2(1). P. 1145–1154.
  22. Pacyniak T. The effect of refractory coating permeability on the Lost Foam process. *Archiv. Foundry Eng.* 2008. No. 8(3). P. 199–204.
  23. Griffiths W.D., Davies P.J. The permeability of Lost Foam pattern coatings for Al alloy castings. *J. Mater. Sci.* 2008. No. 43(16). P. 5441–5447.

24. 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 in Trans.* 2014. Vol. 44. No. 4. P. 253—254.
25. 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.
26. 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; Ten E.B., Raxuba E.M., Kimanov B.M., Zholdubaeva Zh.D. Resursy povysheniya rafiniruyushhego potentsiala filtrov dlya zhidkix metallovo [Resources increase refining capacity of filters for liquid metal]. *Litejshhik Rossii.* 2013. No. 11. P. 38—42.
27. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Белов Н.А., Приходько О.Г., Пономарева 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.
28. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. М: Машиностроение-1, 2005; Nikitin V.I., Nikitin K.V. Nasledstvennost v lityx splavax [Heredity in cast alloys]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005.
29. 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., 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. No. 3. P. 202—210.
30. 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 силуминов // 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.
31. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Popova N.A., Konovalov 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. No. 5. P. 1056—1059.
32. Ivanov Y.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Semina O.A. Evolution of Al—19.4Si alloy surface structure after electron beam treatment and high cycle fatigue. *Mater. Sci. Technol.* 2015. Vol. 31. No. 13. P. 1523—1529.
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. of 22-nd Int. Conf. on metallurgy and materials.* 2013. No. 1. P. 1152—1156.
35. Деев В.Б., Пономарева К.В., Приходько О.Г., Сметанюк С.В. Влияние температуры 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; Deev V.B., Ponomareva K.V., Prikhodko O.G., Smetanyuk S.V. The effect of overheating temperature and melt pouring temperature on the aluminum alloy casting quality in lost foam casting. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 4.