

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КРЕМНИСТОЙ ЛАТУНИ ЛЦ16К4 С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЖИДКОТЕКУЧЕСТИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ХУДОЖЕСТВЕННОГО ЛИТЬЯ

© 2016 г. С.П. Герасимов, А.Ю. Титов, В.А. Палачев, В.Б. Деев

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

*Статья поступила в редакцию 06.07.15 г., доработана и подписана в печать 03.09.15 г.*

Кремнистая латунь марки ЛЦ16К4 нашла широкое применение в художественном литье за счет высоких технологических свойств, красивого золотого цвета и возможности нанесения различных декоративных покрытий. В работе проведено исследование возможности увеличения ее жидкотекучести путем варьирования химического состава в рамках ГОСТ 17711-93. Для измерения жидкотекучести был использован метод вакуумного всасывания, который выявил изменения этого показателя при добавлении от 0,1 мас.% легирующего элемента (Zn, Si, Al), а также показал высокую сходимость результатов. Экспериментальные данные подвергались регрессионному анализу. Была получена количественная оценка степени влияния цинка и кремния на жидкотекучесть кремнистой латуни, построена адекватная математическая модель и поверхность отклика функции жидкотекучести. Определена оптимальная температура перегрева, обеспечивающая максимальное значение жидкотекучести сплава при минимальном угаре цинка. Результаты данной работы могут быть применимы при получении художественного и промышленного литья из кремнистой латуни ЛЦ16К4, а также в других областях металлургии и литейного производства.

**Ключевые слова:** художественное литье, жидкотекучесть, метод вакуумного всасывания, ЛЦ16К4, кремнистая латунь, влияние перегрева, регрессионный анализ, математическая модель, угар цинка, кремний, медь.

**Герасимов С.П.** — канд. техн. наук, профессор кафедры «Литейные технологии и художественная обработка материалов» НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: gerasimzv@yandex.ru.

**Титов А.Ю.** — аспирант той же кафедры. E-mail: titov.andrey90@gmail.com.

**Палачев В.А.** — канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: val.palachev@yandex.ru.

**Деев В.Б.** — докт. техн. наук, профессор той же кафедры, гл. науч. сотрудник Инжинирингового центра «Литейные технологии и материалы». E-mail: deev.vb@mail.ru.

**Для цитирования:** Герасимов С.П., Титов А.Ю., Палачев В.А., Деев В.Б. Оптимизация состава кремнистой латуни ЛЦ16К4 с целью повышения ее жидкотекучести при получении художественного литья // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 43–48. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-43-48.

*Gerasimov S.P., Titov A.Yu., Palachev V.A., Deev V.B.*

### **Optimization of LC16K4 silicon brass to increase its fluidity in the process of ornamental casting**

LC16K4 silicon brass is widely used in ornamental casting because of its good processing characteristics, beautiful golden color and the possibility to apply various decorative coatings. The paper studies the possibility to increase fluidity of LC16K4 silicon brass by varying its chemical composition according to GOST 17711-93. A vacuum suction method used for fluidity measurement revealed that this parameter changes when adding 0,1 wt.% of the alloying element (Zn, Si, Al) and that measurements show high repeatability. The experimental data were subjected to regression analysis. The effect of zinc and silicon on the silicon brass fluidity was quantitatively assessed, and an adequate mathematical model was built with a response surface of the fluidity function. The optimum melt overheating temperature was found that ensures the highest alloy fluidity with a minimum zinc loss. The results of this study may be useful in ornamental and industrial casting of LC16K4 silicon brass, as well as in other metallurgy and foundry areas.

**Keywords:** ornamental casting, fluidity, vacuum suction method, LC16K4, silicon brass, overheating effect, regression analysis, mathematical model, zinc loss, silicon, copper.

**Gerasimov S.P.** — Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of foundry technologies and art processing of materials, National University of Science and Technology «MISIS» (119049, Moscow, Leninsky prospect, 4). E-mail: gerasimzv@yandex.ru.

**Titov A.Yu.** — Postgraduate of the same Department. E-mail: titov.andrey90@gmail.com.

**Palachev V.A.** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the same Department. E-mail: val.palachev@yandex.ru.

**Deev V.B.** — Dr. Sci. (Tech), Professor of the same Department, Chief Scientific Officer of Engineering center «Foundry technology and materials», MISIS. E-mail: deev.vb@mail.ru.

**Citation:** Gerasimov S.P., Titov A.Yu., Palachev V.A., Deev V.B. Optimizatsiya sostava kremnistoi latuni LTs16K4 s tsel'yu povysheniya ee zhidkotekuchesti pri poluchenii khudozhestvennogo lit'ya. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 2. P. 43–48. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-43-48.

## Введение

Сплавы, применяемые в художественном литье, должны обладать высоким показателем жидкотекучести, поскольку это свойство отвечает за способность расплава заполнять тонкие стенки отливок и воспроизводить рельеф формы, а также за получение качественной литой поверхности.

Одним из наиболее распространенных в художественном литье сплавов является кремнистая латунь марки ЛЦ16К4. Этот сплав имеет высокие технологические и прочностные характеристики, однако при изготовлении из него крупных художественных отливок в формы из холодно-твердеющих смесей в местах с небольшой толщиной стенки образуются различные виды брака, связанного с недоливом металла. Чтобы этого не произошло, приходится прибегать к увеличению толщины стенки художественной отливки, что приводит к повышению массы и стоимости готового изделия.

Поэтому целью работы являлось увеличение жидкотекучести сплава ЛЦ16К4 путем оптимизации его химического состава.

Для измерения жидкотекучести сплава необходимо использовать способ, обладающий высокой чувствительностью к изменению его состава. За последнее время появился ряд работ, в которых используется метод определения жидкотекучести вакуумным всасыванием [1–6]. По сравнению с другими известными способами он значительно точнее, поскольку позволяет максимально стабилизировать температуру, напор подаваемого расплава и химический состав [7].

## Методика исследований и результаты работы

При измерении жидкотекучести использовали специальное устройство, принцип работы которого основан на вакуумном всасывании (рис. 1). Оно состоит из форвакуумного насоса 1 с натекателем 2, который позволяет подбирать и поддерживать необходимый для эксперимента уровень разрежения, а также минимизирует погрешность измерения из-за гидравлического удара в момент включения насоса. Разрежение в системе определяется образцовым манометром 3 с точностью 0,0025 атм, который включен в систему параллельно. Две кварцевые трубки 7 длиной 500 мм, внутренним диаметром 4 мм и толщиной стенки 1 мм

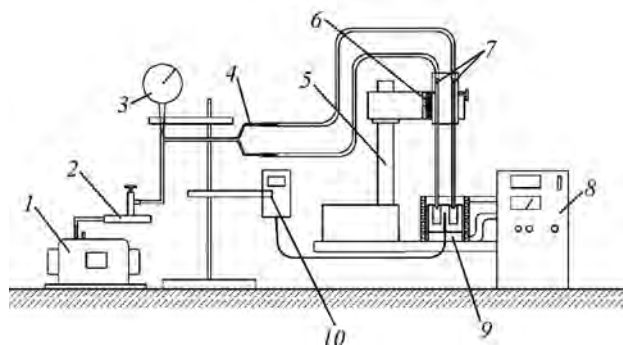


Рис. 1. Схема устройства для определения жидкотекучести

1 – форвакуумный насос, 2 – натекатель, 3 – образцовый манометр, 4 – тройник, 5 – стойка-штатив, 6 – линейка, 7 – кварцевые трубки, 8 – лабораторная индукционная печь, 9 – массивный графитовый блок, 10 – милливольтметр с хромель-алюмелевой термопарой

соединяются шлангом с вакуумной системой посредством тройника 4. Погружение трубок в расплав осуществляется с помощью механизма перемещения на стойке-штативе 5 с точностью до 1 мм. Глубина погружения контролируется линейкой 6.

Плавка расплава проводится в алундовых тиглях диаметром 25 мм и высотой 60 мм в индукционной печи 8 типа СЭЛТ 001-10/18. Для обеспечения одинаковых условий нагрева и охлаждения расплавов используется массивный графитовый блок 9 с отверстиями под тигли. Температура измеряется милливольтметром 10 и хромель-алюмелевой термопарой, подведенной к его нижней части. Из-за массивности графитового блока его температура везде одинаковая, что обеспечивает одинаковую температуру в обоих тиглях.

Опробование методики эксперимента производилось путем определения влияния малых добавок Al на жидкотекучесть меди марки М1 (ГОСТ 859-78). Предварительно осуществлялась настройка оптимального для проведения эксперимента разрежения, которое подбиралось таким образом, чтобы высота столба металла в трубке при условии отсутствия кристаллизации расплава не превышала 500 мм. Его оптимальная величина составила 0,4 атм.

Две навески меди (массой по 100 г каждая) загружались в алундовые тигли, которые помещались в графитовый блок 9. Во избежание окисления расплава меди плавка осуществлялась под графитовым боем. После расплавления меди производилось легирование расплава в одном из тиглей небольшой порцией алюминия. Когда легирующий элемент полностью растворялся, расплав интен-

сивно перемешивался и после достижения необходимой температуры перегрева, которая составляла 100 °С над линией ликвидуса, трубки погружались в расплавы на 12 мм и включался насос. При этом происходило втягивание металла в трубки на высоту, характеризующую жидкотекучесть сплавов. После этого расплав выдерживался в трубках при остаточном разрежении в течение 2–3 с, не позволяющем металлу сливаться из трубок.

Экспериментальные результаты по исследованию жидкотекучести ( $\lambda$ ) сплава в зависимости от добавок алюминия представлены на рис. 2, и они хорошо согласуются с литературными данными [8, 9] (рис. 3). Сравнивая приведенные зависимости, можно сделать вывод, что способ вакуумного всасывания значительно чувствительнее, чем U-образная проба, и позволяет определять изменение  $\lambda$

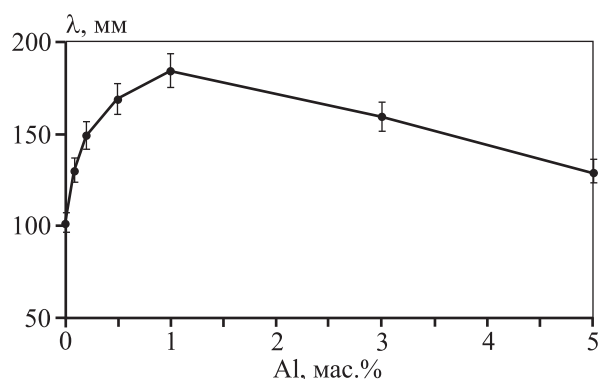


Рис. 2. Зависимость жидкотекучести меди от содержания алюминия при температуре перегрева в 100 °С над линией ликвидуса

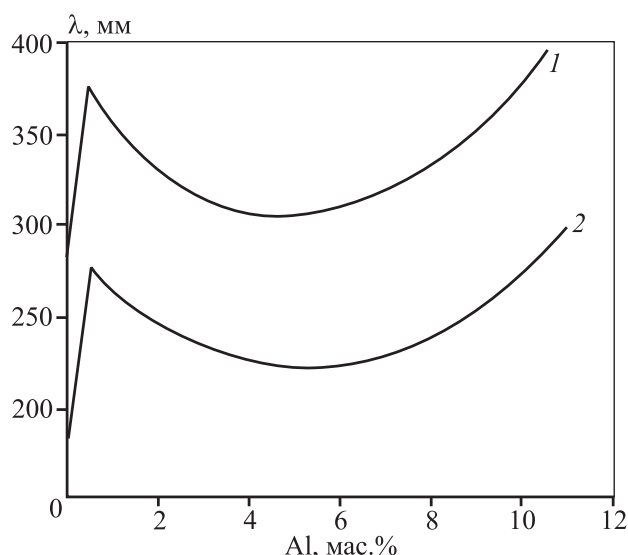


Рис. 3. Зависимость жидкотекучести меди, определенной по U-образной пробе, от содержания алюминия [7, 8]  
1 — литье в песчаную форму, 2 — литье в кокиль

при добавлении от 0,1 мас.% легирующего элемента при сходимости результатов параллельных опытов в 1–2 мм.

Для определения оптимального состава кремнистой латуни, обеспечивающего максимальную жидкотекучесть, из чистых металлов были приготовлены экспериментальные сплавы латуни, содержащие 12 и 19 мас.% Zn, что соответствует минимальному и максимальному количествам цинка в латуни ЛЦ16К4 согласно ГОСТ 17711-93. Для этого использовались медь марки М1 (ГОСТ 859-78) и цинк марки Ц0 (ГОСТ 3640-94).

В графитовый блок помещались тигли со 100-граммовыми навесками сплава с одинаковым содержанием Zn. Затем производились их плавка и легирование кремнием от 3 до 4,5 мас.% с шагом в 0,5 %. После растворения Si расплав выдерживался в течение 5 мин, и при достижении необходимой температуры перегрева в 100 °С над линией ликвидуса осуществлялось измерение жидкотекучести полученных сплавов.

При проведении экспериментов учитывали, что увеличение содержания Si в сплаве приводит к снижению температуры ликвидуса [10–14]. Предварительно были получены кривые охлаждения сплавов с различным содержанием Zn (12–19 мас.%) и Si (3,0–4,5 мас.%). Для этого использовали двухканальный измеритель температуры ТРМ-200 фирмы «Овен», который позволил определить температуры ликвидуса ( $t_l$ ) исследуемых сплавов с точностью до 5 °С. Экспериментальные результаты представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Для численного выражения характера влияния легирующих элементов на жидкотекучесть крем-

Таблица 1  
Влияние содержания Zn и Si на температуру ликвидуса и интервал кристаллизации кремнистой латуни ЛЦ16К4

Содержание, мас.%		$t_l$ , °С	Интервал кристаллизации, °С
Si	Zn		
3,0	12	952	62
3,5	12	928	60
4,0	12	913	47
4,5	12	891	25
3,0	19	887	29
3,5	19	876	22
4,0	19	842	42
4,5	19	838	38

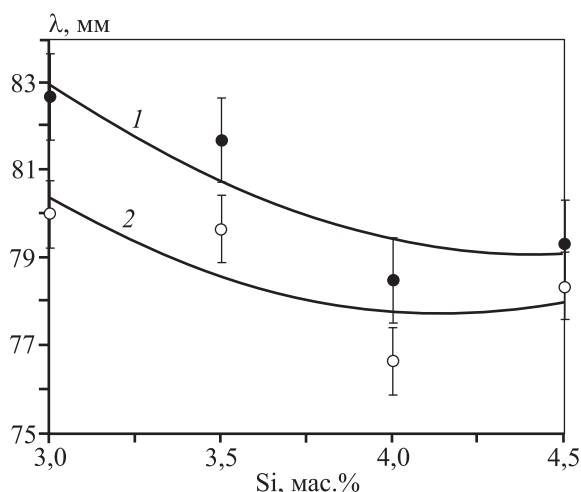


Рис. 4. Влияние содержания Zn и Si на жидкотекучесть латуни ЛЦ16К4 состава Cu–19%Zn (1) и Cu–12%Zn (2)

нистой латуни использовали регрессионный анализ экспериментальных данных. Все расчеты проводились для 95 %-ной значимости результатов.

Была получена адекватная математическая модель, которая прошла статистические проверки по критериям Стьюдента ( $t$ -критерий) и Фишера ( $F$ -критерий):

$$Y = 79,9 + 1,08X_1 - 1,41X_2,$$

где  $Y$  — жидкотекучесть, мм;  $X_1$  и  $X_2$  — содержания в сплаве соответственно Zn и Si, мас. %.

Математическая модель позволила количественно оценить характер влияния концентраций Si и Zn на жидкотекучесть сплава. Было выявлено, что для получения повышенной жидкотекучести содержание кремния в сплаве следует поддерживать на нижнем уровне, а цинка — на верхнем, согласно ГОСТ 17711-93. Таким образом, оптимальный состав исследуемого сплава, обладающего лучшими показателями по жидкотекучести, включает 3 мас.% Si и 19 мас.% Zn.

На основании полученных данных была построена поверхность отклика функции жидкотекучести кремнистой латуни ЛЦ16К4 в интервалах концентраций, регулируемых ГОСТ 17711-93 (рис. 5).

Варьирование химического состава сплава позволило улучшить жидкотекучесть в среднем на 7–10 %. Дальнейшее ее увеличение возможно за счет повышения температуры заливки. Для определения степени влияния температуры перегрева расплава на жидкотекучесть кремнистой латуни проводили эксперимент, в котором две

100-граммовые навески сплава Cu–19%Zn–3%Si расплавились в алундовых тиглях, помещенных в полости массивного графитового блока, и после достижения перегрева над линией ликвидуса в 40 °С определяли показатель  $\lambda$ . Измерение жидкотекучести повторяли каждые 30 °С до температуры перегрева 310 °С. Результаты исследований представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Полученная зависимость  $\lambda(t)$  показывает, что интенсивное увеличение жидкотекучести латуни наблюдается до перегрева 200 °С, а затем ее рост снижается. Поэтому разогревать расплав выше 200 °С над линией ликвидуса нецелесообразно. Однако такой перегрев приводит к значительному угару Zn.

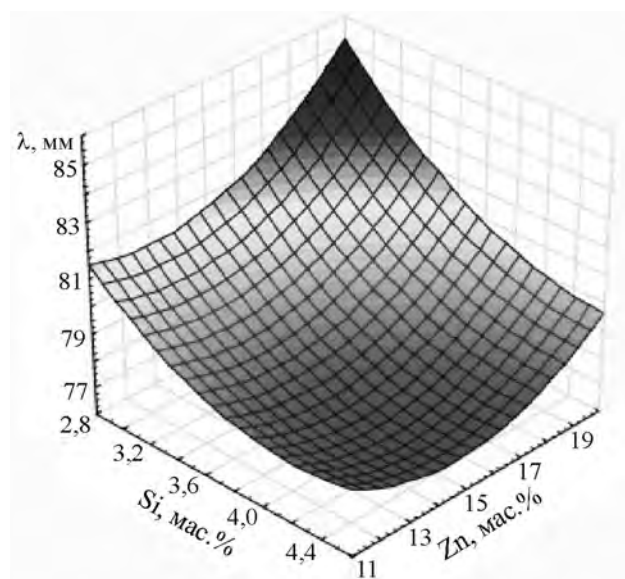


Рис. 5. Поверхность отклика функции жидкотекучести сплава ЛЦ16К4 в интервале концентраций 12–19 мас.% Zn и 3–4,5 мас.% Si, регулируемых ГОСТ 17711-93

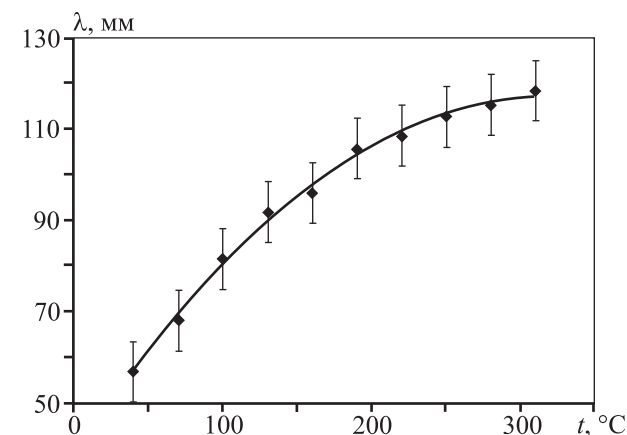


Рис. 6. Зависимость средней (по 3 измерениям) жидкотекучести кремнистой латуни ЛЦ16К4 от температуры перегрева над линией ликвидуса

Таблица 2  
Влияние температуры перегрева над линией ликвидуса на жидкотекучесть латуни

Температура измерения $\lambda$ , °С	Температура перегрева расплава, °С	Жидкотекучесть по трем измерениям, мм		
		1	2	3
930	40	57,0	57,0	57,0
960	70	69,5	67,0	68,0
990	100	82,0	82,0	81,0
1020	130	92,0	92,0	92,0
1050	160	97,0	95,5	97,0
1080	190	107,0	104,5	106,0
1110	220	109,5	108,3	108,2
1140	250	112,0	113,3	113,2
1170	280	118,5	113,3	114,5
1200	310	118,5	118,5	118,5

Таблица 3  
Угар цинка (средние значения) в зависимости от температуры перегрева над линией ликвидуса и содержания кремния в латуни ЛЦ16К4

Содержание в сплаве Si, мас. %	Температура перегрева, °С	Содержание в сплаве Zn, мас. %		Угар Zn, %
		Исходный	После выдержки	
3,23	50	19,39	19,35	0,18
3,23	100	19,39	19,22	0,49
3,23	150	19,39	18,72	0,84
3,23	200	19,39	19,09	1,54
4,54	50	19,39	19,46	0,37
4,54	100	19,39	19,23	0,39
4,54	150	19,39	19,31	0,81
4,54	200	19,39	18,94	2,34

Примечание. Для каждого образца было проведено по 3 плавки.

Согласно литературным данным [15, 16] кремний способствует уменьшению величины угара цинка при плавке латуни. Как было показано ранее, увеличение содержания Si в составе латуни приводит к уменьшению жидкотекучести, поэтому для определения оптимальной температуры заливки необходимо установить, при каком ее значении в сплавах с различным содержанием кремния начинается интенсивный угар Zn. Для этого сплавы, содержащие 3,23 и 4,54 мас. % Si и 19,39 мас. % Zn, выдерживались 15 мин при различных температурах перегрева, и затем заливались пробы для

химического анализа. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Интенсивный угар цинка наблюдается в образцах, выдержанных с перегревом в 200 °С, в остальных же он незначительный и практически не зависит от содержания Si в исследованном интервале концентраций.

Таким образом, оптимальная температура заливки кремнистой латуни составляет 1040—1070 °С.

## Заключение

Проведенные исследования позволили установить, что жидкотекучесть кремнистой латуни повышается с увеличением в ее составе содержания Zn и снижается с ростом концентрации Si. Таким образом, лучшим по этому показателю является сплав Cu—19%Zn—3%Si, у которого жидкотекучесть в среднем на 7—10 % выше, чем у сплава Cu—12%Zn—4,5%Si.

Выявлено, что оптимальная температура заливки латуни ЛЦ14К4 составляет 1040—1070 °С, что соответствует 150—170 °С перегрева над линией ликвидуса и не приводит к интенсивному угару цинка, который, как показали исследования, начинается при перегреве, близком к 200 °С.

Полученные научные результаты при использовании их в промышленных условиях позволят сократить брак по причине недолива при производстве крупных художественных отливок в формы из холодно-твердеющих смесей, а также изготавливать более тонкостенные отливки.

*Работа выполнена в рамках государственной работы «Организация проведения научных исследований» государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014—2016 гг. (задание № 2014/113).*

## Литература

1. Han Q.Y., Xu H.B. Fluidity of alloys under high pressure die casting conditions // Scripta Mater. 2005. No. 53. P. 7—10.
2. Sweatman K., Nishimura T. The Fluidity of the Ni-Modified Sn-Cu Eutectic Lead Free Solder // Presented at IPC Printed Circuits Expo, APEX and the Designers Summit. Osaka, Japan, 2006. P. 1—6.
3. Hua Q., Gao D., Zhang H., Zhai Q. Influence of alloy elements and pouring temperature on the fluidity of cast magnesium alloy // Mater. Sci. Eng. A. 2007. Vol. 444. P. 69—74.

4. *Никитин К.В., Тимошкин И.Ю., Волостнов А.В.* Наследственное влияние модифицирования на затвердевание силуминов, определенное методом вакуумного всасывания // *Литейщик России*. 2009. No. 7. С. 29—32.
5. *Akhaze M.N.* Comparative Studies of the Fluidity of Some Selected Non-Ferrous Metals and Alloys // *J. Energy Technol. Policy*. 2012. Vol. 2. No. 5. P. 15—19.
6. *Sabatino M. Di., Syvertsen F., Arnberg L., Nordmark A.* An Improved method for Fluidity measurement by Gravity Casting of Spirals in sand moulds // *Norway Inter. J. Cast Metals Research*. 2005. No. 18. P. 59—62.
7. *Beeley P.R.* Foundry Technology. London: Butterworth & Co. Ltd., 2001.
8. *Герасимов С.П., Чурсин В.М.* Технология, теплотехника и автоматизация металлургического производства // *Тр. МВМИ*. 1971. No. 12. С. 121—123.
9. *Чурсин В.М.* Плавка медных сплавов. М.: Металлургия, 1982.
10. *Miettinen J.* Thermodynamic description of the Cu—Si—Zn system in the copper-rich corner // *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2007. No. 31. P. 422—427.
11. *Лякишева Н.П.* Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3 т. М.: Машиностроение, 1997. Т. 2.
12. *Davis J.R.* Asm Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys. Hardcover: ASM International, 2001.
13. *Borggren U., Selleby M.* A Thermodynamic Database for Special Brass // *J. Phase Equilibria*. 2003. Vol. 24. No. 2. P. 110—121.
14. *Doostmohammadi H., Moridshahi H.* Effects of Si on the microstructure, ordering transformation and properties of the Cu<sub>60</sub>Zn<sub>40</sub> alloy // *J. Alloys Comp.* 2015. Vol. 640. P. 401—407.
15. *Осипцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы, отечественные и зарубежные марки: Справочник. М.: Машиностроение, 2004.
16. *Урвачев В.П., Кочетков В.В., Горина Н.Б.* Ювелирное и художественное литье по выплавляемым моделям сплавов меди. Челябинск: Металлургия, 1991.
3. *Hua Q., Gao D., Zhang H., Zhai Q.* Influence of alloy elements and pouring temperature on the fluidity of cast magnesium alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. Vol. 444. P. 69—74.
4. *Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu., Volostnov A.V.* Nasledstvennoe vliyanie modifitsirovaniya na zatverdevanie siluminov, opredelennoe metodom vakuumnogo vsasyvaniya [The hereditary effect of the modification on the solidification silumins determined by vacuum suction]. *Liteishchik Rossii*. 2009. No. 7. P. 29—32.
5. *Akhaze M.N.* Comparative Studies of the Fluidity of Some Selected Non-Ferrous Metals and Alloys. *J. Energy Technol. Policy*. 2012. Vol. 2. No. 5. P. 15—19.
6. *Sabatino M. Di., Syvertsen F., Arnberg L., Nordmark A.* An Improved method for Fluidity measurement by Gravity Casting of Spirals in sand moulds. *Norway Inter. J. Cast Metals Research*. 2005. No. 18. P. 59—62.
7. *Beeley P.R.* Foundry Technology. London: Butterworth & Co. Ltd., 2001.
8. *Gerasimov S.P., Chursin V.M.* Tekhnologiya, teplotekhnika i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva [Technology, thermotechnics and automation of metallurgical production]. *Trudy Moskovskogo vechernego metallurgicheskogo instituta*. 1971. No. 12. P. 121—123.
9. *Chursin V.M.* Plavka mednykh splovov [Melting of copper alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1982.
10. *Miettinen J.* Thermodynamic description of the Cu—Si—Zn system in the copper-rich corner. *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2007. No. 31. P. 422—427.
11. *Lyakisheva N.P.* Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskikh sistem: Spravochnik [The phase diagrams of binary metallic systems: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1997. Vol. 2.
12. *Davis J.R.* Asm Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys. Hardcover: ASM International, 2001.
13. *Borggren U., Selleby M.* A Thermodynamic Database for Special Brass. *J. Phase Equilibria*. 2003. Vol. 24. No. 2. P. 110—121.
14. *Doostmohammadi H., Moridshahi H.* Effects of Si on the microstructure, ordering transformation and properties of the Cu<sub>60</sub>Zn<sub>40</sub> alloy. *J. Alloys Comp.* 2015. Vol. 640. P. 401—407.
15. *Osintsev O.E., Fedorov V.N.* Med' i mednye splavy otechestvennye i zarubezhnye marki: Spravochnik [Copper and copper alloys domestic and foreign grade: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 2004.
16. *Urvachev V.P., Kochetkov V.V., Gorina N.B.* Yuvelirnoe i khudozhestvennoe lit'e po vyplavlyаемым modelyam splovov medi [Jewelry and art investment casting copper alloys]. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1991.

## References

1. *Han Q.Y., Xu H.B.* Fluidity of alloys under high pressure die casting conditions. *Scripta Mater.* 2005. No. 53. P. 7—10.
2. *Sweatman K., Nishimura T.* The Fluidity of the Ni-Modified Sn-Cu Eutectic Lead Free Solder. In: *Presented at IPC Printed Circuits Expo, APEX and the Desidners Summit*. Osaka, Japan, 2006. P. 1—6.