

ISSN 0372-2929

ISSN 0132-0890

**ЦВЕТНЫЕ  
МЕТАЛЛЫ**

**Черные  
металлы**

[www.rudmet.ru](http://www.rudmet.ru)

• СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК •

**2014**

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ • ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ • Специальный выпуск • 2014



**115 лет**

*Санкт-Петербургскому  
государственному  
политехническому университету*



УДК 669.71.055:669.782

## Разработка количественных методов оценки структуры доэвтектических силуминов для прогнозирования их механических свойств



**А. А. Казаков**  
Докт. техн. наук, профессор,  
СПбГПУ



**Д. В. Киселев**  
Инженер, СПбГПУ



**А. А. Кур**  
Аспирант, СПбГПУ  
Эл. почта: kur@thixomet.ru,



**Е. Б. Лазутова**  
Инженер-исследователь I кат.,  
Исследовательский центр ОАО  
«АвтоВАЗ», г. Тольятти, Россия

Разработаны и реализованы в виде отдельного модуля анализатора изображений Thixomet PRO методы количественной оценки микроструктуры доэвтектических силуминов. Для исследований выбраны сплавы АК6М2 и АК10М2Н в немодифицированном состоянии и после обработки различными модификаторами. Это позволило получить различную дисперсность Al – Si-эвтектики, охватывающую все классы модифицированности в соответствии со стандартными шкалами Американского общества литейщиков. Разработан коэффициент дисперсности эвтектики этих сплавов: на бинарном изображении частиц кремния вычисляли среднее расстояние от всех точек, расположенных внутри частиц, до их границ. Величина, обратная этому среднему расстоянию, названа коэффициентом дисперсности эвтектики, описывающим все классы модифицированности в соответствии со стандартными шкалами Американского общества литейщиков. Найдены уравнения регрессии, адекватно описывающие механические свойства исследованных литейных сплавов в зависимости от разработанного коэффициента дисперсности эвтектики, а также от объемных долей пористости и крупных (>5 мкм) интерметаллидов, оцененных по ASTM E 1245. Для интерпретации природы фаз, обнаруженных при электронно-микроскопических исследованиях, использовали термодинамическое моделирование с помощью программного обеспечения FactSage, оснащенного базами данных SGTE. Построены номограммы, иллюстрирующие влияние каждого из исследованных параметров структуры на механические свойства сплавов АК6М2 и АК10М2Н. Разработанные методы прогнозирования свойств сплавов по их структуре могут быть использованы в производстве доэвтектических силуминов для контроля их качества при прямо-сдаточных испытаниях.

**Ключевые слова:** доэвтектические силумины, микроструктура, дисперсность эвтектики, пористость, интерметаллидные включения, механические свойства.

### Введение

Для оценки структуры доэвтектических силуминов в промышленности применяют методы, основанные на стандартных шкалах (дисперсность эвтектики, пористость, неметаллические включения) либо описательные, основанные на поиске браковочных признаков структуры. Такая оценка субъективна и неточна.

Цель данной работы — разработка методик количественной оценки структуры доэвтектических силуминов для поиска взаимосвязи структуры и свойств. Исследованы литейные сплавы АК6М2 и АК10М2Н, применяемые для изготовления деталей в авиа- и автомобилестроении, в частности для отливки автомобильных поршней.

### Методика исследований

Литейные алюминиевые сплавы АК6М2 и АК10М2Н исследовали на образцах после растяжения. Марочный состав сплавов приведен в **таблице**.

Образцы исследовали без модифицирования и после обработки расплава различными модификаторами: 0,02 % Sr, 0,02 % Ti, добавкой 1 % (мас.) быстрозакаленных мелкокристаллических сплавов того же состава. Всего было изучено 22 образца. Тепловые условия разлива и затвердевания во всех экспериментах были одинаковыми. Цель этих экспериментов — получить Al – Si-эвтектику, соответствующую всем классам модифицированности Американского общества литейщиков (American Foundry Society, AFS).

Механические свойства (предел текучести, предел прочности, удлинение) оценивали при комнатной темпера-



Химический состав сплавов АК6М2 и АК10М2Н

Марка сплава	Si	Cu	Mg	Ti	Mn	Ni	Fe	Zn	Al
АК6М2	5,5–6,5	1,8–2,3	0,30–0,45	0,10–0,20	До 0,10	До 0,05	До 0,6	До 0,06	Основа
АК10М2Н	9,5–10,5	2,0–2,5	0,90–1,20	До 0,05	До 0,05	0,80–1,20	До 0,6	До 0,06	Основа

туре после испытаний на универсальной машине Zwick/Roell Z150 по ГОСТ 1497–84 [1].

Микроструктуру оценивали с помощью анализатора изображений Thixomet Pro. Для определения дисперсности эвтектики и пористости использовали панорамные изображения микроструктуры площадью 10 мм<sup>2</sup> при увеличении  $\times 500$ . Исследования интерметаллидных фаз проводили на панорамных изображениях площадью 0,5 мм<sup>2</sup> при увеличении  $\times 1000$ .

Для оценки состава фаз, выявленных с помощью травления, применяли растровый электронный микроскоп Zeiss Supra 55VP с приставкой Inca.

Для выявления интерметаллидных фаз использовали травление 30%-ным водным раствором едкого натра в течение 5–10 с. Для селективного травления железосодержащей  $\beta$ -фазы использовали 10%-ный водный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, нагретый до температуры 70 °С.

Для интерпретации природы обнаруженных фаз применяли термодинамическое моделирование с помощью программного обеспечения FactSage, оснащенного базами данных SGTE [2].

Результаты исследований и их обсуждение

Оценивали следующие параметры структуры сплавов: дисперсность эвтектики, объемную долю пор и крупных интерметаллидов размером  $>5$  мкм.

Без специальной обработки расплава в готовых отливках частицы кремния в двойной Al – Si-эвтектике отличаются грубой пластинчатой формой, что значительно снижает механические свойства сплава [3]. Модифицирование расплава приводит к снижению температуры эвтектического превращения и адсорбционному торможению роста кристаллов кремния при затвердевании, поэтому их форма изменяется от пластинчатой к волокнустой или сферической [4, 5].

На панорамных изображениях частицы кремния выделяли по уровню серого, выбирая соответствующий уровень порога дискриминации. На полученном таким образом бинарном изображении частиц кремния вычисляли среднее расстояние от всех точек, расположенных внутри частиц, до их границ. Величину, обратную этому среднему расстоянию, назовем коэффициентом дисперсности эвтектики, который хорошо согласуется с соответствующими стандартными шкалами модифицированности эвтектики по классификации AFS (рис. 1, 2). Пологая часть кривой на рис. 2 связана с изменением морфологии частиц на соответствующих стандартных шкалах, при этом дисперсность частиц, найденная описанным выше способом, на этих шкалах меняется незначительно.

Согласно ГОСТ 1583–93 [6], в России контролируют только видимые невооруженным глазом поры диаметром  $>100$  мкм. Однако мелкие усадочные поры, образовавшиеся из-за дефицита жидкости в затвердевающем междендритном пространстве, или водородная пористость могут значительно снижать механические свойства сплавов [7]. Поры выделяли по уровню серого, анализируя их объемную долю по ASTM E124ц5–03(2008) [8].

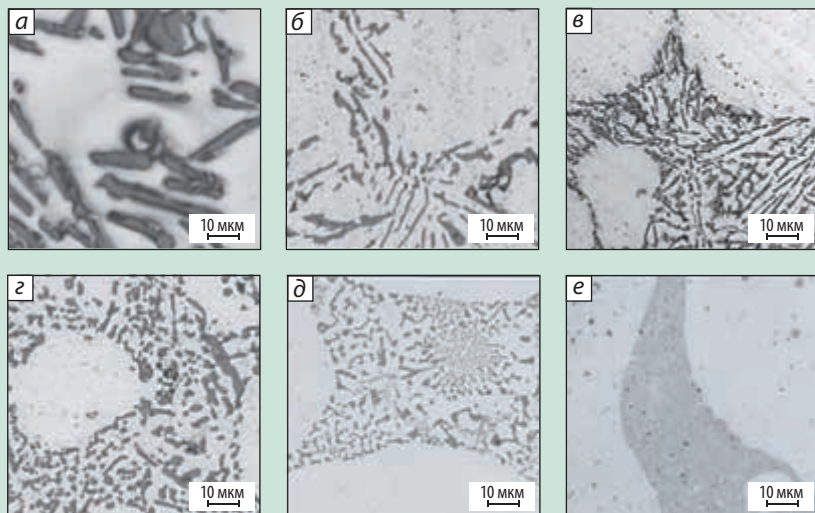


Рис. 1. Структуры Al – Si-эвтектики в соответствии с классами модифицированности AFS: а–е — 1–6 соответственно



Рис. 2. Соответствие класса Al – Si-эвтектики (согласно AFS) коэффициенту дисперсности





Медь и магний упрочняют твердый раствор алюминия, а никель в пределах нескольких процентов значительно повышает жаропрочность сплава [9–11]. Однако избыточные концентрации этих элементов приводят к образованию крупных интерметаллидов, снижающих механические свойства сплава [12].

Образцы исследовали на электронном микроскопе, а для интерпретации обнаруженных интерметаллидных фаз проводили термодинамическое моделирование процессов фазообразования при неравновесной кристаллизации исследуемых сплавов, оценивая ликвацию по уравнению Гулливера – Шейла (рис. 3).

Железосодержащая β-фаза (Al<sub>5</sub>FeSi) образуется из жидкости в самом начале затвердевания, что позволяет ей свободно расти, формируя крупные пластинчатые интерметаллиды с характерной огранкой [13]. Частицы Al<sub>2</sub>Cu образуются в составе эвтектики в конце затвердевания, поэтому для них характерна мелкодисперсная структура. В сплаве АК10М2Н они образуются на подложке Al<sub>3</sub>Ni и могут формироваться в виде более круп-

ных частиц. При травлении частицы кремния темнеют, а цвет интерметаллидов практически не меняется. После применения численного метода подчеркивания границ интерметаллиды могут быть выделены по уровню серого и оценены количественно с помощью анализатора изображений.

Найденные параметры структуры сплавов АК6М2 и АК10М2Н использованы для построения статистических моделей структура – свойства:

- для сплава АК6М2:

$$\sigma_b = 175,56 - 12,28V_i - 2,13V_p + 63,81K_d$$

$$\delta = 2,993 - 1,102V_i - 0,00964V_p + 2,05902K_d$$

- для сплава АК10М2Н:

$$\sigma_b = 231,54 - 12,28V_i - 2,13V_p + 75,33K_d$$

$$\delta = 0,404 - 0,081V_i - 0,00964V_p + 0,714K_d$$

здесь  $V_i$  — объемная доля крупных (>5 мкм) интерметаллидов;  $V_p$  — объемная доля пор;  $K_d$  — коэффициент дисперсности эвтектики.

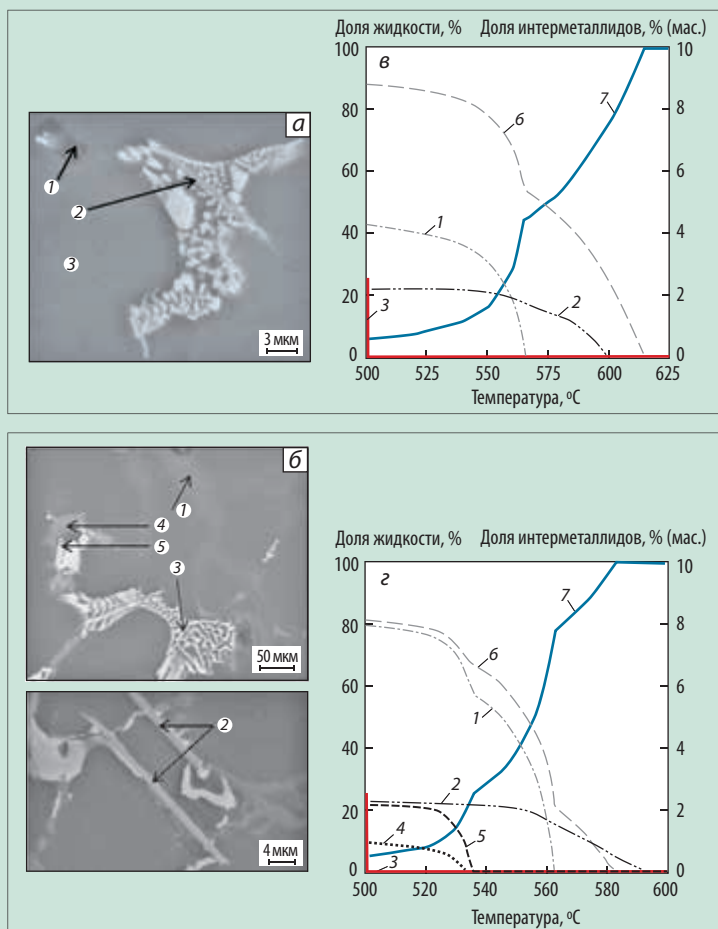


Рис. 3. Интерметаллидные включения в сплавах (а, б) и их интерпретации (в, г): а, в — сплав АК6М2; б, г — сплав АК10М2Н; 1 — Si; 2 — Al<sub>5</sub>FeSi; 3 — Al<sub>2</sub>Cu; 4 — Mg<sub>2</sub>Si; 5 — Al<sub>3</sub>Ni; 6 — твердый α-раствор; 7 — жидкая фаза

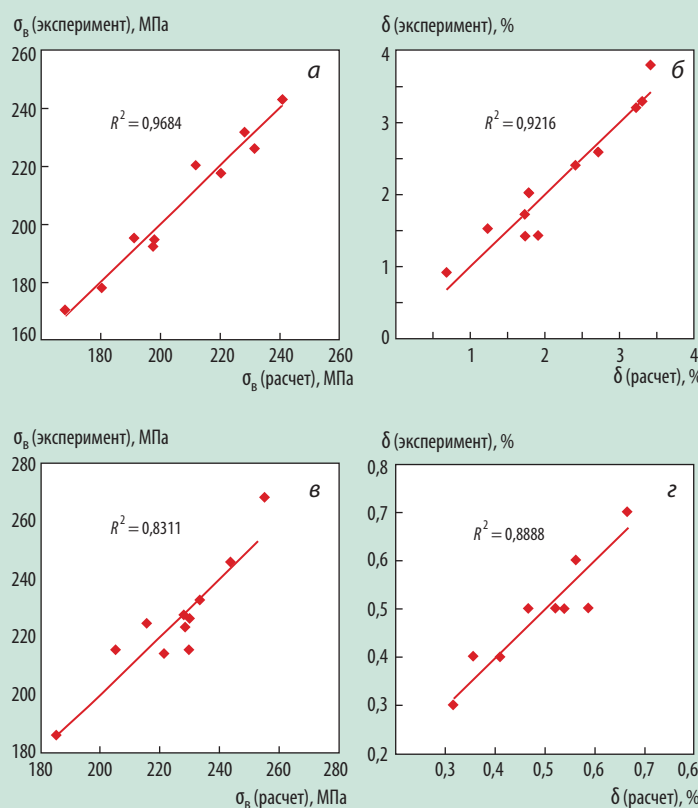
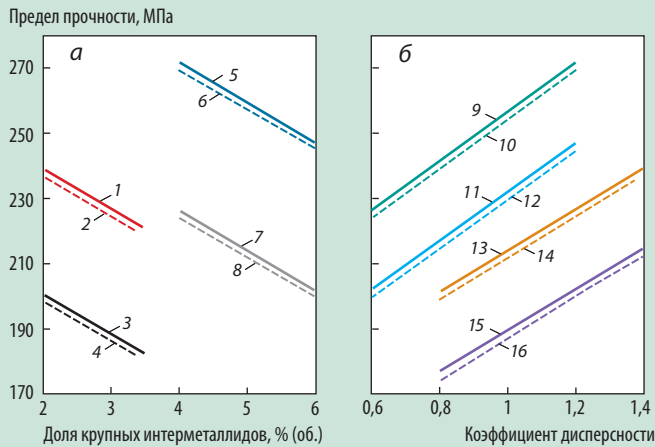


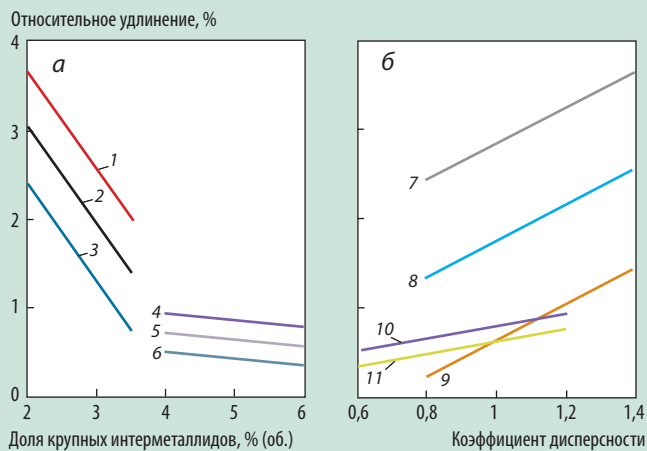
Рис. 4. Измеренные и прогнозируемые свойства сплавов АК6М2 (а, б) и АК10М2Н (в, г): предел прочности (а, в) и относительное удлинение (б, г)



На рис. 4 показано соответствие измеренных и прогнозируемых свойств; ясно видна высокая адекватность найденных моделей.



**Рис. 5.** Влияние объемной доли крупных (>5 мкм) интерметаллидов (а) и дисперсности эвтектики (б) на предел прочности сплавов АК6М2 (1–4, 13–16) и АК10М2Н (5–12):  
 1, 5 —  $V_p = 0,5\%$ ,  $K_d = 0,6$ ; 2, 6 —  $V_p = 1,5\%$ ,  $K_d = 0,8$ ; 3 —  $V_p = 0,5\%$ ,  $K_d = 1,4$ ; 4 —  $V_p = 1,5\%$ ,  $K_d = 1,4$ ; 7 —  $V_p = 0,5\%$ ,  $K_d = 1,2$ ; 8 —  $V_p = 1,5\%$ ,  $K_d = 1,2$ ; 9, 15 —  $V_p = 0,5\%$ ,  $V_i = 4\%$ ; 10, 14 —  $V_p = 1,5\%$ ,  $V_i = 4\%$ ; 11 —  $V_p = 0,5\%$ ,  $V_i = 6\%$ ; 12 —  $V_p = 1,5\%$ ,  $V_i = 6\%$ ; 13 —  $V_p = 0,5\%$ ,  $V_i = 2\%$ ; 16 —  $V_p = 1,5\%$ ,  $V_i = 4\%$



**Рис. 6.** Влияние объемной доли крупных (более 5 мкм) интерметаллидов (а) и дисперсности эвтектики (б) на относительное удлинение сплавов АК6М2 (1–3, 7–9) и АК10М2Н (4–6, 10, 11):  
 1 —  $K_d = 0,8$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 2 —  $K_d = 1,1$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 3 —  $K_d = 1,4$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 4 —  $K_d = 0,6$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 5 —  $K_d = 0,9$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 6 —  $K_d = 1,2$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 7 —  $V_i = 2\%$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 8 —  $V_i = 3\%$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 9, 10 —  $V_i = 4\%$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$ ; 11 —  $V_i = 6\%$ ,  $V_p = 0,5-1,5\%$

Для оценки влияния каждого из исследуемых параметров структуры на свойства сплавов по найденным уравнениям регрессии построены номограммы (рис. 5, 6).

Повышение пористости и объемной доли крупных интерметаллидов, а также огрубление Al – Si-эвтектики приводит к снижению прочностных и пластических свойств литейных алюминиево-кремниевых сплавов. Построенные номограммы могут быть использованы для прогнозирования свойств сплавов по результатам исследования их микроструктуры.

**Библиографический список**

- ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — Введ. 1986–01–01.
- Bale C. W., Chartrand P., Degterov S. A., Eriksson G., Hack K., Mahfoud R. B., Melançon J., Pelton A. D., Petersen S. FactSage Thermochemical Software and Databases // Calphad. 2002, Vol. 26, N 2. P. 189–228.
- Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. — М.: Metallurgia, 1979. — 640 с.
- Makhloufe M. M., Guthy H. V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography // Journal of Light Metals. 2001. Vol. 1, N 4. P. 199–218.
- Spheroidization of the Al – Si Eutectic in a Cast Aluminum Alloy // Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. Vol. 9, N 6. P. 616–622.
- ГОСТ 1583–93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. — Введ. 1997–01–01.
- Dinnis C. M., Otte M. O., Dahle A. K., Taylor J. A. The Influence of Strontium on Porosity Formation in Al – Si Alloys // Metallurgical and materials transactions A. 2004. Vol. 35, N 11. P. 3531–3541.
- ASTM E1245–03(2008). Standart Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis. — Approved 2008.
- Zeren M., Karakulak E., Gümüş S. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al – Si – xCu-alloys // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 21. P. 1698–1702.
- Haque M. M., Khan A. A. Influence of Magnesium on Structure and Properties of Al – Si Alloy // Advanced Materials Research. 2007. Vol. 23. P. 291–294.
- Rana R. S., Purohit R., Das S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites // International Journal of Scientific and Research Publications. 2012. Vol. 2, N 6. P. 54–60.
- Белов Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. — М.: МИСиС, 2010. — 511 с.
- Золоторевский В. С., Белов Н. А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. — М.: МИСиС, 2005. — 376 с.



**DEVELOPMENT OF QUANTITATIVE METHODS OF ASSESSMENT OF STRUCTURE OF HYPOEUTECTIC SILUMINS FOR FORECASTING OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES**

Kazakov A. A.<sup>1</sup>, Dr. Eng., Professor  
Kiselev D. V.<sup>1</sup>, Engineer

Kur A. A.<sup>1</sup>, Post-Graduate Student, e-mail: kur@thixomet.ru

Lazutova E. B.<sup>2</sup>, First Category Research Engineer

<sup>1</sup> Saint Petersburg State Polytechnical University, Saint Petersburg, Russia.

<sup>2</sup> Research Center of "Avtovaz" JSC, Tolyatti, Russia.

**Abstract:** Quantitative methods for evaluation of microstructure of hypoeutectic aluminum-silicon alloys were developed and implemented as a plug-in of image analyzer Thixomet PRO. Unmodified and processed AK6M2 and AK10M2N alloys were investigated, which made possible to obtain various degree of fineness of Al – Si eutectic, which covered all classes of modification in accordance with the standard bar chards of American Foundry Society (AFS). Coefficient of eutectic fineness of these alloys was developed: the average distance between all pixels, located within the particles to their boundaries, was calculated at the binary image of silicon particles. The reciprocal of this average distance is called a coefficient of eutectic fineness and describes all classes of modification in accordance with the standard bar chards of AFS. Regression equations were calculated. They adequately describe the mechanical properties of investigated cast alloys, based on the developed coefficient of eutectic fineness and volume fractions of porosity and coarse intermetallic inclusions (greater than 5 micron), evaluated by usage of ASTM E 1245. For the purpose of interpretation of nature of the phases, found by microprobe analysis, thermodynamic modeling was applied, using FactSage software, powered by SGTE databases. There were designed the nomograms, illustrating the effect of each of the studied parameters of the structure on mechanical properties of AK6M2 and AK10M2N alloys. Developed methods for forecasting of hypoeutectic aluminum-silicon alloys' properties by their structure can be used in their production for quality control during acceptance tests.

**Key words:** hypoeutectic silumins, microstructure, fineness of eutectic, porosity, intermetallic inclusions, mechanical properties.

**References**

1. GOST 1497–84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie (State Standard 1497–84. Metals. Tensile strength test methods). Introduced: January 01, 1986.
2. Bale C. W., Chartrand P., Degterov S. A., Eriksson G., Hack K., Mahfoud R. B., Melançon J., Pelton A. D., Petersen S. FactSage Thermochemical Software and Databases. Calphad. 2002. Vol. 26, No. 2. pp. 189–228.
3. L. F. Mondolfo. Struktura i svoystva alyuminievykh splavov (Structure and properties of aluminium alloys). Moscow : Metallurgiya, 1979. 640 p.
4. Makhlouf M. M., Guthy H. V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. Journal of Light Metals. 2001. Vol. 1, No. 4. pp. 199–218.
5. Spheroidization of the Al – Si Eutectic in a Cast Aluminum Alloy. Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. Vol. 9, No. 6. pp. 616–622.
6. GOST 1583–93. Splavy alyuminievye liteynye. Tekhnicheskie usloviya (State Standard 1583–93. Aluminium casting alloys. Technical requirements). Introduced: January 01, 1997.
7. Dinnis C. M., Otte M. O., Dahle A. K., Taylor J. A. The Influence of Strontium on Porosity Formation in Al – Si Alloys. Metallurgical and materials transactions A. 2004. Vol. 35, No. 11. pp. 3531–3541.
8. ASTM E1245–03(2008). Standart Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis. Approved: 2008.
9. Zeren M., Karakulak E., Gümüş S. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al – Si – xCu-alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 21. pp. 1698–1702.
10. Haque M. M., Khan A. A. Influence of Magnesium on Structure and Properties of Al – Si Alloy. Advanced Materials Research. 2007. Vol. 23. pp. 291–294.
11. Rana R. S., Purohit R., Das S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. International Journal of Scientific and Research Publications. 2012. Vol. 2, No. 6. pp. 54–60.
12. Belov N. A. Fazovyy sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminievykh splavov (Phase composition of industrial and prospective aluminium alloys). Moscow : MISiS, 2010. 511 p.
13. Zolotarevskiy V. S., Belov N. A. Metallovedenie liteynykh alyuminievykh splavov (Metal science of aluminium casting alloys). Moscow : MISiS, 2005. 376 p.

