

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛУМИНОВ

© 2017 г. **К.В. Никитин, В.И. Никитин, И.Ю. Тимошкин**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)

*Статья поступила в редакцию 09.01.16 г., доработана 08.11.16 г., подписана в печать 14.11.16 г.*

Повышение суммы легирующих элементов в промышленных силуминах обуславливает формирование в их структуре избыточных интерметаллидных фаз. При внесении в такие сплавы модификаторов выше некоторого определенного количества происходит огрубление структурных составляющих вследствие перемодифицирования, что может вызвать снижение механических свойств литых сплавов. С увеличением суммы легирующих элементов в сплавах от 7,35 % (АК7ч) до 14,3 % (АК10М2Н) оптимальный расход модифицирующего микрокристаллического переплава уменьшается с 0,6 до 0,3 мас.%. При использовании лигатуры АITi5 оптимальное количество вводимого титана снижается с 0,05 до 0,01 %, а в случае лигатуры АITi5B1 – с 0,02 до 0,01 %. С увеличением содержания кремния усиливается модифицирующее воздействие лигатуры АISr10, причем при меньших количествах вводимого в сплавы стронция. Показано, что расход металлического модификатора зависит от его модифицирующей способности, а также от суммы легирующих элементов в модифицируемом силумине.

**Ключевые слова:** промышленные силумины, сумма легирующих элементов, микрокристаллический модифицирующий переплав, микрокристаллические модифицирующие лигатуры, оптимальный расход модификаторов.

**Никитин К.В.** – докт. техн. наук, доцент, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). Тел.: (846) 333-61-01. Факс: (846) 242-22-68.  
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Никитин В.И.** – докт. техн. наук, проф., заведующий кафедрой литейных и высокоэффективных технологий СамГТУ. Тел./факс: (846) 242-22-68. E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Тимошкин И.Ю.** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. Тел.: (846) 333-61-01. Факс: (846) 242-22-68.  
E-mail: ivan-mns@mail.ru.

**Для цитирования:** Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю. Влияние модификаторов на изменение механических свойств силуминов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 3. С. 72–76.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-72-76.

*Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu.*

### **Influence of modifiers on the change of mechanical properties of silumins**

An increase in the sum of alloying elements in industrial silumins causes excess intermetallic phases to form in their structure. When the amount of modifiers introduced into such alloys exceeds a certain amount, structural components coarsen due to overmodification, which may cause deterioration of mechanical properties of cast alloys. As the amount of alloying elements in alloys increases from 7,35 % (AK7ch) to 14,3 % (AK10M2N), the optimum consumption of the modifying microcrystalline remelt decreases from 0,6 to 0,3 wt.%. The optimum amount of introduced titanium is reduced from 0,05 to 0,01 % when using the AITi5 master alloy and from 0,02 to 0,01 % when using the AITi5B1 master alloy. With an increase in the silicon content, the modifying effect of the AISr10 master alloy is enhanced, while the amounts of strontium introduced into alloys are smaller. The paper demonstrates that metallic modifier consumption depends on its modifying property, as well as on the sum of alloying elements in the modified silumin.

**Keywords:** industrial silumins, amount of alloying elements, microcrystalline modifying remelt, microcrystalline modifying master alloys, optimized flow of modifiers.

**Nikitin K.V.** – Dr. Sci. (Tech.), associate prof., dean of the faculty of mechanical engineering, metallurgy and transport of Samara State Technical University (SSTU) (443100, Russia, Samara, Molodogvardeiskaya str., 244).  
E-mail: kvn-6411@mail.ru.

**Nikitin V.I.** – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.  
E-mail: tlp@samgtu.ru.

**Timoshkin I.Yu.** – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of foundry and high-efficiency technologies, SSTU.

**Citation:** Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu. Vliyanie modifikatorov na izmenenie mekhanicheskikh svoystv siluminov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 3. P. 72–76. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-72-76.

## Введение

Анализ общемировых тенденций по управлению качеством литых изделий из сплавов системы Al—Si показывает, что основным направлением является модифицирование их структуры, которое может осуществляться с помощью физических воздействий на расплавы, а также за счет введения различных модифицирующих добавок (как правило, лигатур различных составов).

Актуальными являются способы, которые основаны на высокотемпературной обработке расплавов [1—4]. При этом основное внимание уделяется заэвтектическим сплавам с содержанием кремния 17—20 % [2, 3]. Это, вероятно, связано с тем, что данные сплавы могут использоваться в качестве как лигатур, так и основы для приготовления сплавов поршневого назначения. Показано, что различные виды температурно-временной обработки заэвтектических расплавов способствуют изменению морфологии и существенному измельчению кристаллов первичного кремния в структуре твердых сплавов. Исследования перегретых расплавов на основе алюминия с различным содержанием кремния с помощью малоуглового рассеяния нейтронов (small angle neutron scattering — SANS) показали, что в них присутствуют частицы (элементы структуры расплавов), унаследованные от исходных шихтовых материалов [5].

Влияние комплексной обработки на структуру и свойства силуминов изучалось в работах [6—8]. Обработка сплавов в твердотелом состоянии сдвиговыми деформациями [6] или синтезирование упрочняющих фаз непосредственно в расплаве [7] обеспечивает формирование благоприятных структурных составляющих и высоких физико-механических свойств силуминов. Значительное измельчение кристаллов эвтектического кремния в силумине марки А356.2 (по стандарту США ASTM B179-92) установлено при совместном модифицировании добавками стронция и термовременной обработке расплава [9].

По-прежнему большое внимание исследователей уделяется вопросам модифицирования алюминиевых сплавов и разработки новых составов модификаторов с металлической матрицей [10—12]. В данном направлении в основном изучается влияние лигатур Al—Ti и Al—Ti—В различных составов. Отмечается [12], что перспективными модификаторами для алюминиевых сплавов являются лигатуры Al—6Ti—0,02С, Al—3Ti—0,15С,

Al—1Sc, Al—2Sc, а также лигатуры более сложных составов Al—Ti—С—Sr, которые воздействуют одновременно на кристаллы кремния и дендриты алюминия в силуминах. При этом подчеркивается, что наибольшую эффективность имеют прутковые лигатуры, которые получают или твердофазной деформацией из слитков, или совмещенными процессами литья и деформации.

Следует отметить, что в исследованиях по модифицированию сплавов системы Al—Si практически не уделяется внимание эффективности модифицирования в зависимости от суммы легирующих элементов в сплавах. В связи с этим в настоящей работе представлены результаты по изучению эффективности различных модификаторов с металлической матрицей в зависимости от суммы легирующих элементов в силуминах промышленных марок.

## Материалы и методика экспериментов

Было исследовано влияние микрокристаллических модификаторов на структуру и свойства 5 марок промышленных силуминов.

Компоненты шихты и виды реагентов для рафинирования сплавов представлены в табл. 1.

Сплавы готовили в печи сопротивления в графитошамотном тигле емкостью 10 кг по алюминию. Небольшую часть готовых сплавов заливали в водоохлаждаемый валковый кристаллизатор, получая ленты толщиной 1,5—2,0 мм. Кристаллизация сплавов при этом происходила со скоростью охлаждения  $v_{\text{охл}} \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ . Согласно классификации, такой вид шихты относится к модифицирующим микрокристаллическим переплавам (ММКП) [13—15]. Оставшуюся часть готовых сплавов заливали в чугунные изложницы, получая чушки толщиной 20—25 мм. Химические составы сплавов соответствовали требованиям ГОСТ.

Эксперименты по модифицированию сплавов проводили в настольных печах сопротивления GRAFICARBO в стальных, окрашенных противопригарной краской тиглях емкостью 0,4 кг по алюминию. Навески сплавов отдельно расплавливали и при температуре  $740 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  осуществляли модифицирование. После выдержки в течение 10 мин производили заливку расплавов в чугунный кокиль, получая опытную отливку типа «пластина» толщиной 15 мм. Характеристики применяемых модификаторов и их количества, вводимые в расплавы, представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Компоненты шихты, используемые для приготовления сплавов**

Марка сплава	ГОСТ	Компоненты шихты	Реагенты для рафинирования
AK7ч	1583-93	Чушковые алюминий марки А7, силумин марки СИЛО, магний марки Mg90	Хлористый цинк (0,2 % от массы плавки)
AK9ч		Чушковые алюминий марки А7, силумин марки СИЛО, магний марки Mg90, лигатура AlMn10	Смесь солей 33 % NaCl + 67 % KCl (0,1 % от массы плавки)
AK8M3ч		Чушковый сплав	—
AK6M2		Отходы в виде кокильных образцов для механических испытаний	—
AK10M2H	30620-98	Отходы в виде бракованных поршней	—

Таблица 2

**Характеристика применяемых модификаторов**

№ п/п	Модификатор	Количество, вводимое в сплав, %	Способ получения
1	ММкП	0,1–1,5 (по массе)	Заливка в валковый водоохлаждаемый кристаллизатор ( $v_{\text{охл}} \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C/с}$ )
2	AlTi5	0,01–0,03 (по Ti)	Заливка в валковый водоохлаждаемый кристаллизатор ( $v_{\text{охл}} \sim 10^2 \text{ }^\circ\text{C/с}$ )
3	AlSr10	0,01–0,03 (по Sr)	Заливка в валковый водоохлаждаемый кристаллизатор ( $v_{\text{охл}} \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C/с}$ )
4	AlTi5B1	0,005–0,02 (по Ti)	Пруток, получаемый деформацией

Примечание. ММкП – модифицирующий микрокристаллический переплав соответствующего сплава по табл. 1. Модификаторы 1–3 получали в Центре литейных технологий СамГТУ, производитель 4 – фирма KBM (Нидерланды). Химические составы модификаторов 2–4 соответствовали ГОСТ 53777-2010.

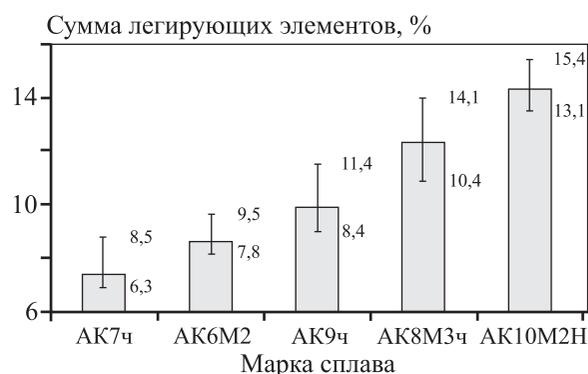
Временное сопротивление и относительное удлинение определяли в литом состоянии на вырезанных из отливки образцах (ГОСТ 1497-84).

## Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследуемые сплавы существенно отличаются друг от друга суммой легирующих элементов, интервалы которых регламентируются соответствующими стандартами (рис. 1).

В табл. 3 приведены оптимальные количества модификаторов, при которых были получены наиболее высокие значения физико-механических свойств у исследуемых силуминов. На рис. 2 показано влияние модификаторов при их оптимальной добавке (по табл. 3) на механические свойства сплавов.

Анализ полученных результатов позволил установить взаимосвязь между суммой легирующих элементов в силуминах и оптимальным количеством вводимых модификаторов (рис. 3). Видно, что с увеличением суммы легирующих элементов в сплавах отмечается устойчивая тенденция к снижению расхода модификаторов.



**Рис. 1.** Распределение сплавов по сумме легирующих элементов

Цифры у планок – минимально и максимально допустимое содержание суммы легирующих

Повышение суммы легирующих элементов способствует формированию дисперсной структуры сплавов и избыточных интерметаллидных фаз. При внесении металлических модификаторов выше некоторого определенного количества, вероятно, происходит перемодифицирование и огрубление структурных составляющих, что вызывает снижение механических свойств.

Таблица 3  
Оптимальные количества модификаторов  
в зависимости от марки силуминов

Марка сплава	Оптимальное количество модификатора, %			
	ММкП (по массе)	AlTi5 (по Ti)	AlSr10 (по Sr)	AlTi5B1 (по Ti)
AK7ч	0,6	0,05	—	0,02
AK6M2	0,5	0,02	0,02	0,015
AK9ч	0,5	0,02	0,015	0,01
AK8M3ч	0,4	0,03	—	—
AK10M2H	0,3	0,01	0,01	0,01

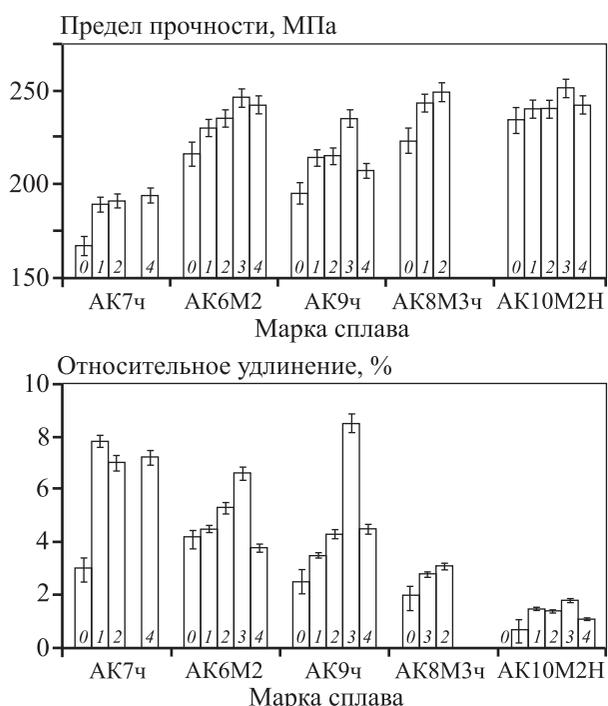


Рис. 2. Влияние вида модификаторов при их оптимальном количестве (по табл. 3) на механические свойства сплавов  
0 – без модифицирования; 1–4 – модификаторы по табл. 2

С ростом содержания кремния усиливается модифицирующее воздействие лигатуры AlSr10, причем при меньших количествах вводимого в сплавы стронция.

Следует отметить эффективность модифицирующих микрокристаллических переплавов. Причем с увеличением суммы легирующих элементов в сплавах растет и эффективность добавок ММкП со снижением их расхода от 0,6 до 0,3 мас. %.

## Заключение

На основании проведенных исследований установлена зависимость расхода модификатора от

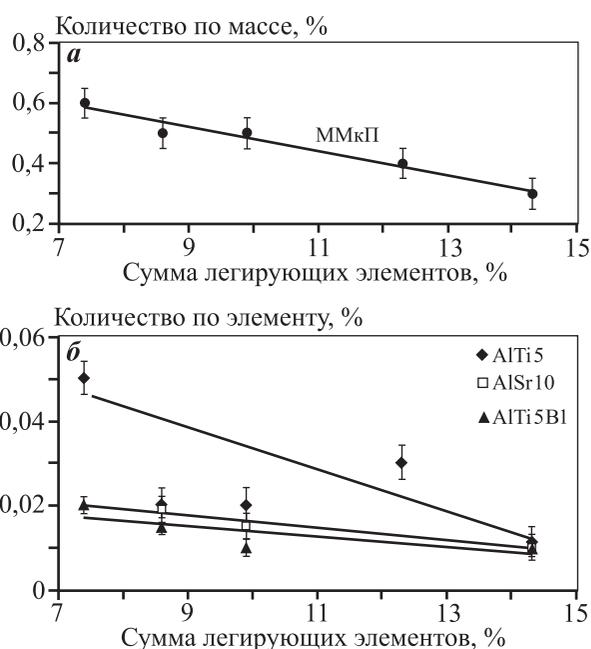


Рис. 3. Влияние суммы легирующих элементов в силуминах на оптимальное количество модификаторов, обеспечивающее наибольший прирост свойств в исследованном диапазоне  
а – модифицирование добавками ММкП;  
б – микрокристаллическими лигатурами

суммы легирующих элементов в промышленных силуминах. С увеличением данного показателя от 7,35 % (AK7ч) до 14,3 % (AK10M2H) оптимальный расход модифицирующего микрокристаллического переплава (ММкП) уменьшается с 0,6 до 0,3 мас. %. Снижается оптимальное количество вводимого титана с 0,05 до 0,01 % при использовании лигатуры AlTi5 и с 0,02 до 0,01 % — в случае лигатуры AlTi5B1. Такая же тенденция установлена и для лигатуры AlSr10. Результаты исследований позволяют сформулировать важный практический вывод: оптимальный расход металлического модификатора зависит от его модифицирующей способности, а также от суммы легирующих элементов в модифицируемом силумине.

*Работа выполнена при финансовой поддержке из средств Министерства образования и науки России, выделяемых на программу развития СамГТУ в качестве опорного вуза.*

## Литература

1. Mishra R.K., Venkatesh R. Theoretical evaluation of structural and various associated properties of Al—Si melts // Chem. Phys. 2008. Vol. 354. No. 1—3. P. 112—117.
2. Piątkowski J. The effect of Al—17wt.%Si alloy melt overheating on solidification process and microstructure evolution // Solid State Phenomena. 2011. Vol. 176. P. 29—34.

3. *Shittu M.D., Ibitoye S.A., Olawale J.O., Popoola A.P.I.* Superheat influence on mechanical properties of cast hypoeutectic aluminium-silicon alloy // *Int. J. Cast Met. Res.* 2012. Vol. 25. No. 3. P. 170—175.
4. *Piqtowski J., Gajdzik B., Matuła T.* Crystallization and structure of cast A390.0 alloy with melt overheating temperature // *Metalurgija.* 2012. Vol. 51. No. 3. P. 321—324.
5. *Calvo-Dahlborg M., Popel P.S., Kramer M.J., Besser M., Morris J.R., Dahlborg U.* Superheat-dependent microstructure of molten Al—Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering // *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 550. P. 9—22.
6. *Barekar N.S., Babu N.H., Fan Z., Dhindaw B.K.* Effect of intensive shearing on morphology of primary silicon and properties of hypereutectic Al—Si alloy // *Mater. Sci. Technol.* 2010. Vol. 26. No. 8. P. 975—980.
7. *Liu Z., Xie M.* Hypereutectic Al—Si—Mg in situ composite prepared by melt superheating // *Adv. Mater. Res.* 2011. Vol. 194—196. P. 113—116.
8. *Sun Y., Wang Q., Geng H.* Effects of complex modifying technique on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al—Si alloys // *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47. No. 5. P. 2104—2109.
9. *Al Kahtani S.A.* Effect of melt thermal treatment on eutectic silicon particles characteristics in cast Al—Si—Mg alloys // *Adv. Mater. Sci. Appl.* 2013. Vol. 2. Iss. 4. P. 144—153.
10. *Nagendra Prasad K., Kumar R.* Investigations on effects of grain refinement on aluminum alloy casting // *Int. J. Emerg. Trends Eng. Develop.* 2015. Vol. 4. Iss. 5. P. 490—501.
11. *Rathod N.R., Manghani J.V.* Effect of modifier and grain refiner on cast Al-7Si aluminum alloy: A review // *Int. J. Emerg. Trends Eng. Develop.* 2012. Iss. 2. Vol. 5. P. 574—581.
12. *Lakhwinder S., Geetesh G., Rupinderpreet S.* Review of the latest developments in grain refinement // *Int. J. Modern Eng. Res.* 2012. Vol. 2. Iss. 4. P. 2724—2727.
13. *Никитин В.И., Никитин К.В.* Научные принципы создания нового класса мелкокристаллических модификаторов для металлических расплавов // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: Матер. IV междунар. конф. (Москва, 26—29 апр. 2005 г.). М.: Знание, 2005. С. 297—307.
14. *Никитин В.И., Никитин К.В.* Наследственность в литых сплавах. М.: Mashinostroyeniye-1, 2005.
15. *Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю.* Управление качеством литых изделий из алюминиевых сплавов на основе явления структурной наследственности. М.: Радуница, 2015.
- heating on solidification process and microstructure evolution. *Solid State Phenomena.* 2011. Vol. 176. P. 29—34.
3. *Shittu M.D., Ibitoye S.A., Olawale J.O., Popoola A.P.I.* Superheat influence on mechanical properties of cast hypoeutectic aluminium-silicon alloy. *Int. J. Cast Met. Res.* 2012. Vol. 25. No. 3. P. 170—175.
4. *Piqtowski J., Gajdzik B., Matuła T.* Crystallization and structure of cast A390.0 alloy with melt overheating temperature. *Metalurgija.* 2012. Vol. 51. No. 3. P. 321—324.
5. *Calvo-Dahlborg M., Popel P.S., Kramer M.J., Besser M., Morris J.R., Dahlborg U.* Superheat-dependent microstructure of molten Al—Si alloys of different compositions studied by small angle neutron scattering. *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 550. P. 9—22.
6. *Barekar N.S., Babu N.H., Fan Z., Dhindaw B.K.* Effect of intensive shearing on morphology of primary silicon and properties of hypereutectic Al—Si alloy. *Mater. Sci. Technol.* 2010. Vol. 26. No. 8. P. 975—980.
7. *Liu Z., Xie M.* Hypereutectic Al—Si—Mg in situ composite prepared by melt superheating. *Adv. Mater. Res.* 2011. Vol. 194—196. P. 113—116.
8. *Sun Y., Wang Q., Geng H.* Effects of complex modifying technique on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al—Si alloys. *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47. No. 5. P. 2104—2109.
9. *Al Kahtani S.A.* Effect of melt thermal treatment on eutectic silicon particles characteristics in cast Al—Si—Mg alloys. *Adv. Mater. Sci. Appl.* 2013. Vol. 2. Iss. 4. P. 144—153.
10. *Nagendra Prasad K., Kumar R.* Investigations on effects of grain refinement on aluminum alloy casting. *Int. J. Emerg. Trends Eng. Develop.* 2015. Vol. 4. Iss. 5. P. 490—501.
11. *Rathod N.R., Manghani J.V.* Effect of modifier and grain refiner on cast Al-7Si aluminum alloy: A review. *Int. J. Emerg. Trends Eng. Develop.* 2012. Iss. 2. Vol. 5. P. 574—581.
12. *Lakhwinder S., Geetesh G., Rupinderpreet S.* Review of the latest developments in grain refinement. *Int. J. Modern Eng. Res.* 2012. Vol. 2. Iss. 4. P. 2724—2727.
13. *Nikitin V.I., Nikitin K.V.* Nauchnye printsipy sozdaniya novogo klassa melkokristallicheskikh modifikatorov dlya modifitsirovaniya metallicheskikh rasplavov. In: *Teoriya i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh materialov i novykh metallicheskikh splavov*: Mater. IV mezhdunar. konf. [Scientific principles of creation of a new class of fine-crystalline modifiers for metal melts. In: *Theory and practice of technologies of manufacturing of products from composite materials and new metal alloys*: Mater. IV Int. conf. (Moscow, 26—29 April 2005)]. Moscow: Znanie, 2005. P. 297—307.
14. *Nikitin V.I., Nikitin K.V.* Nasledstvennost' v litykh splavakh [Hereditiy in cast alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2005.
15. *Nikitin K.V., Nikitin V.I., Timoshkin I.Yu.* Upravlenie kachestvom litykh izdelii iz alyuminiyevykh splavov na osnove yavleniya strukturnoi nasledstvennosti [Quality control of cast products from aluminium alloys based on the phenomenon of structural heredity]. Moscow: Radunitsa, 2015.

## References

1. *Mishra R.K., Venkatesh R.* Theoretical evaluation of structural and various associated properties of Al—Si melts. *Chem. Phys.* 2008. Vol. 354. No. 1—3. P. 112—117.
2. *Piqtowski J.* The effect of Al—17wt.%Si alloy melt over-