

## ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

---

---

УДК 621.745.55

### КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АК12

Шляпцева А.Д.<sup>\*</sup>, Петров И.А.<sup>\*\*</sup>, Ряховский А.П.<sup>\*\*\*</sup>, Моисеев В.С.<sup>\*\*\*</sup>

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*<sup>\*</sup> e-mail: dimash881@yandex.ru*

*<sup>\*\*</sup> e-mail: Lumen-2007g@mail.ru*

*<sup>\*\*\*</sup> e-mail: castinglp@mati.ru*

---

Показано, что обработка сплава АК12 углеродосодержащим газом фреоном-12 позволяет эффективно воздействовать на структуру эвтектического силумина и повышает его механические свойства. Наибольший эффект модифицирования достигается при совместной обработке расплава газом и солевой композицией, оказывающей комплексное модифицирующее воздействие на сплав. В состав солевой композиции входят поверхностно-активные вещества и вещества, образующие дополнительные центры кристаллизации. Модифицирующий эффект усиливается за счет образования в расплаве дисперсных частиц карбидов.

*Ключевые слова:* модифицирование силуминов фреоном, влияние фреона на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов.

---

#### Введение

Возрастающими требованиями к качеству авиационных изделий [1] обусловлена актуальность разработки модифицирующих составов, позволяющих одновременно диспергировать все фазовые составляющие силуминов, значительно повышая физико-механические и эксплуатационные свойства сплава. При этом новые эффективные универсальные модификаторы должны обладать рядом важных качеств: полное усвоение расплавом, дегазирующая способность, минимальное шлакообразование, низкая стоимость. Эти обстоятельства обеспечивают растущий интерес к использованию

углеродосодержащего сырья различного структурного состояния (графит, сажа, углекислые соли, карбиды, фуллерены, нанотрубки, газообразные углеродосодержащие вещества и др.).

Согласно литературным данным, введение углерода, находящегося в несвязанном состоянии, совместно с другими химическими элементами приводит к изменению механизма кристаллизации расплава силумина, сопровождающегося изменением поверхностного натяжения и химическими реакциями образования карбидов [2]. Модифицирующий эффект при образовании карбидов объясняется наибольшим размерным и структурным подо-

бием карбидов с кристаллической решеткой алюминия или кремния.

Согласно ранее проведенным исследованиям [3], для эффективного комплексного воздействия на структуру и механические свойства силуминов в состав модификатора должны входить компоненты, образующие в расплаве ультрадисперсные карбидные частицы, поверхностно-активные компоненты, а также компоненты, создающие в расплаве дополнительные центры кристаллизации.

В настоящей работе изучалась возможность повышения механических свойств сплава АК12 при обработке расплава углеродосодержащим газом фреон-12 совместно с введением в расплав различных солевых модифицирующих композиций, содержащих графит, барий — как поверхностно-активный элемент, а также титан, создающий в расплаве дополнительные центры кристаллизации.

#### Методика проведения исследований по комплексной модифицирующей обработке сплава АК12

В качестве модельного сплава для исследований был выбран алюминиевый литейный сплав АК12 (АЛ2), содержащий 11,3% Si; содержание Fe не превышало 0,3%. Введение в сплав АК12 модифицирующих компонентов — титана, бария и углерода — производилось с помощью следующих материалов: фтортитанат калия (ТУ 6-09-4200-76); карбонат бария (ГОСТ 2149-75); графит порошкообразный (ГОСТ 23463-79); фреон-12 (R12) (ГОСТ 19212-87). Количество вводимых солевых композиций определялось из расчета количества модифицирующего элемента: 0,2% Ti, 0,3% Ba, 0,2% C (графит) по массе от веса плавки. Модифицирующую солевую композицию, состава ( $K_2TiF_6 + BaCO_3 + C$ ), на основании ранее проведенных исследований [3], вводили в расплав в количестве 2,5% от веса плавки.

Расплав предварительно дегазировали аргоном. При температуре 760—770°C проводилась обработка

расплава фреоном и различными солевыми композициями. Затем расплав выстаивали, после чего с поверхности расплава снимали шлак. При температуре расплава 710°C в подготовленную песчано-глинистую форму производили заливку гагаринских образцов для механических испытаний.

Сбор информационных данных по температуре расплава производили с помощью термопары и модуля USB-9162A компании National Instruments. Морфологию поверхности и элементного состава образца изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа Philips SEM505. Запись температур производилась на компьютер с помощью специально написанной программы в инженерной среде Lab View 7.1.

#### Результаты исследований

Сравнение полученных данных механических испытаний (см. таблицу) показало, что продувка фреоном-12 оказывает модифицирующее воздействие на сплав АК12: по сравнению с немодифицированным сплавом относительное удлинение возрастает с 2,08 до 5,66%, предел прочности увеличивается с 152 до 165 МПа. В микроструктуре опытного сплава по сравнению со структурой немодифицированного сплава (рис. 1,а) наблюдается частичное облагораживание и измельчение частиц кремния в эвтектике (рис. 1,з).

Введение в сплав карбоната бария также обеспечивает повышение относительного удлинения сплава АК12 с 2,08% до 4,15%, в микроструктуре наблюдается измельчение эвтектического кремния, неравномерное по объёму опытного сплава (рис. 1,в). Совместная обработка расплава фреоном и карбонатом бария позволяет усилить модифицирующий эффект: относительное удлинение возрастает до 5,5%, увеличивается предел прочности, в микроструктуре сплава, кроме измельчения кремния в эвтектике, наблюдается большее упорядочивание структуры  $\alpha$ -твёрдого раствора (рис. 1,е). Однако данная совместная обработка не приводит

#### Результаты механических испытаний

Введенные добавки	Механические свойства сплава АК12			
	Без продувки R12		С продувкой R12	
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Без добавок	152	2,08	165	5,66
$BaCO_3$	154	4,15	161	5,50
$K_2TiF_6$	172	6,80	179	6,80
$K_2TiF_6 + C$	170	6,00	157	5,48
$K_2TiF_6 + BaCO_3$	162	7,70	188	9,01
$K_2TiF_6 + BaCO_3 + C$	176	11,00	176	9,40

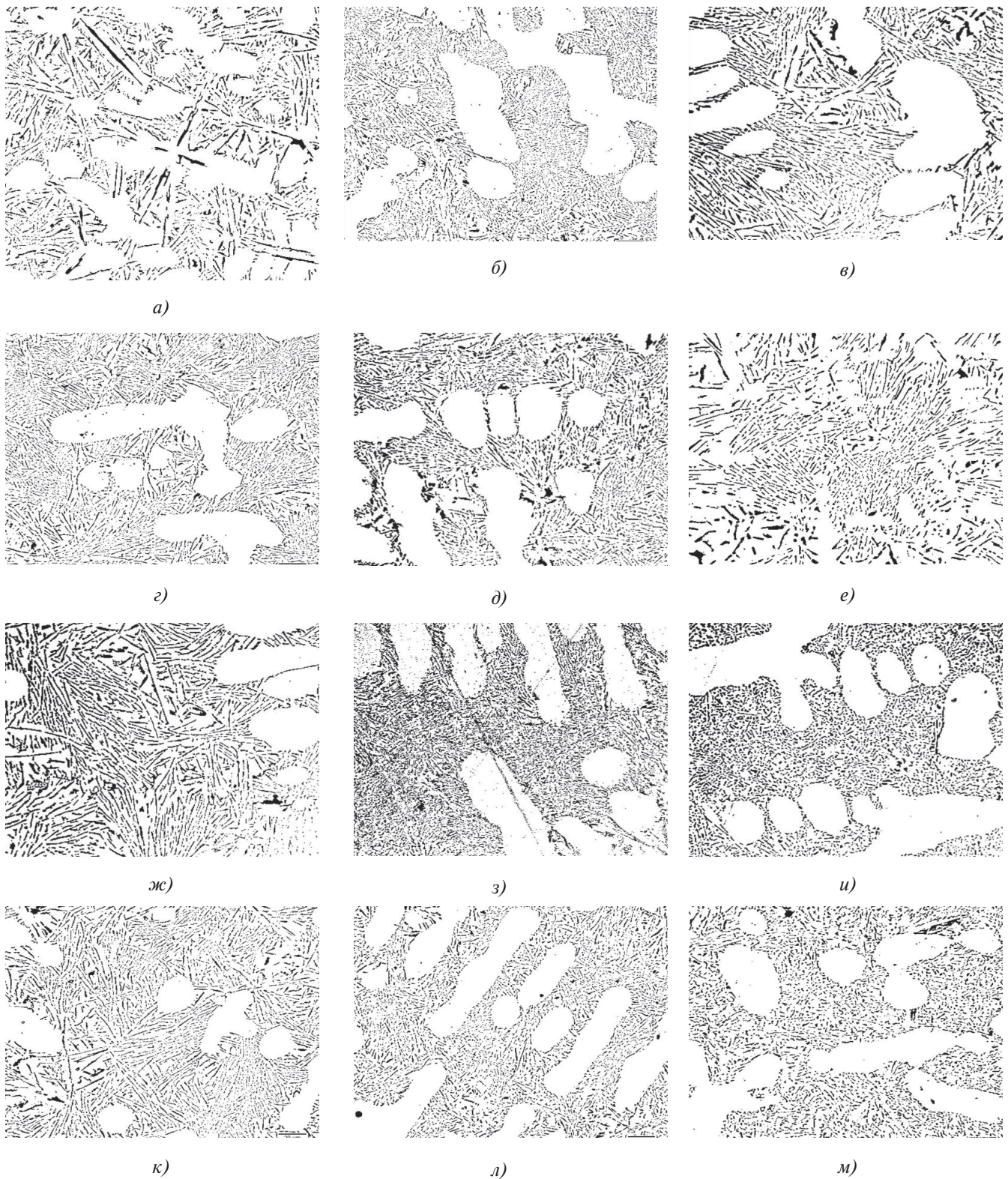


Рис. 1. Микроструктура сплава АК12, обработанного опытными составами,  $\times 500$ : *a* — без модифицирования; *б* —  $K_2TiF_6$ ; *в* —  $BaCO_3$ ; *г* — R12; *д* — R12 +  $K_2TiF_6$ ; *е* — R12 +  $BaCO_3$ ; *ж* —  $K_2TiF_6$  + C; *з* —  $K_2TiF_6$  +  $BaCO_3$ ; *и* —  $K_2TiF_6$  +  $BaCO_3$  + C; *к* — R12 +  $K_2TiF_6$  + C; *л* — R12 +  $K_2TiF_6$  +  $BaCO_3$ ; *м* — R12 +  $K_2TiF_6$  +  $BaCO_3$  + C

к повышению механических свойств сплава по сравнению со сплавом, обработанным фреоном без солевых композиций.

Более значительное повышение механических свойств сплава АК12 наблюдается при его обработ-

ке солью  $K_2TiF_6$ : относительное удлинение увеличивается по сравнению со сплавом, обработанным карбонатом бария, с 4,15% до 6,8%. По микроструктуре опытного сплава видно, что добавка титана влияет на кристаллизацию эвтектики и

$\alpha$ -твёрдого раствора. Происходит измельчение структурных составляющих (рис. 1,б). Обработка расплава  $K_2TiF_6$  совместно с фреоном не приводит к улучшению механических свойств сплава. В модифицированной структуре опытного сплава частицы эвтектического кремния значительно измельчены, но имеют иглообразную форму (рис. 1,д). При этом в структуре присутствуют отдельные немодифицированные участки, тогда как в сплаве, обработанном только  $K_2TiF_6$ , их практически нет.

Введение в расплав композиции солей  $BaCO_3$  и  $K_2TiF_6$  обеспечивает повышение относительного удлинения до 7,7%. Композиция ( $K_2TiF_6 + BaCO_3$ ) оказывает воздействие на микроструктуру сплава, подобное воздействию соли  $K_2TiF_6$ : неравномерное измельчение и облагораживание частиц кремния в эвтектике, упорядочивание структуры сплава (рис. 1,з). При совместной обработке расплава фреоном и смесью ( $K_2TiF_6 + BaCO_3$ ) резко увеличивается модифицирующий эффект, возрастает степень измельчения структуры (рис. 1,а) и повышаются механические свойства сплава АК12: предел прочности достигает 188 МПа, относительное удлинение сплава — 9,01%.

Введение графита в солевую композицию с фтортитанатом калия приводит к понижению уровня механических свойств и огрублению кремния в эвтектике. Эта закономерность наблюдается при обработке расплава данной смесью как без продувки фреоном (рис. 1,ж), так и при совместной обработке расплава (рис. 1,к): без продувки фреоном относительное удлинение падает с 6,80% до 6,00%, с продувкой — с 6,80% до 5,48%.

Применение модифицирующей солевой композиции состава ( $K_2TiF_6 + BaCO_3 + C$ ) увеличивает степень измельчения структуры сплава АК12

(рис. 1,и) и позволяет существенно повысить его механические свойства (относительное удлинение возрастает с 7,7% до 11% по сравнению со сплавом, обработанным ( $BaCO_3 + K_2TiF_6$ )). Обработка расплава АК12 данной солевой композицией совместно с фреоном также позволяет получить высокие механические свойства сплава, однако относительное удлинение сплава снижается с 11% до 9,4%, по сравнению со сплавом, обработанным тем же составом, но без продувки фреоном. Полученный сплав характеризуется упорядоченной структурой, измельчением дендритов  $\alpha$ -твёрдого раствора и равномерным распределением и измельчением частиц кремния в эвтектике (рис. 1,м).

Согласно ранее проведенным исследованиям [3] модифицирующее воздействие солевой композиции состава ( $K_2TiF_6 + BaCO_3 + C$ ) на сплав АК12 объясняется переходом в расплав модифицирующих элементов — титана и бария, а также протеканием экзотермических реакций синтеза карбидов, которые могут служить дополнительными центрами кристаллизации и являться модификаторами  $\alpha$ -твёрдого раствора в эвтектическом силумине.

Можно предположить, что такой же механизм реализуется и при модифицировании сплава АК12 фреоном совместно с солевой композицией ( $K_2TiF_6 + BaCO_3$ ). Исследование изменения температуры расплава в процессе продувки (рис. 2) показало, что при обработке жидкого металла фреоном резко повышается его температура с 760°C до 873°C, что указывает на протекание в расплаве экзотермических реакций, возможно, являющихся реакциями синтеза карбидов [4].

Анализ данных сканирующей электронной микроскопии (рис. 3) и ранее проведенных исследований [2, 5] позволяет предположить, что при совме-

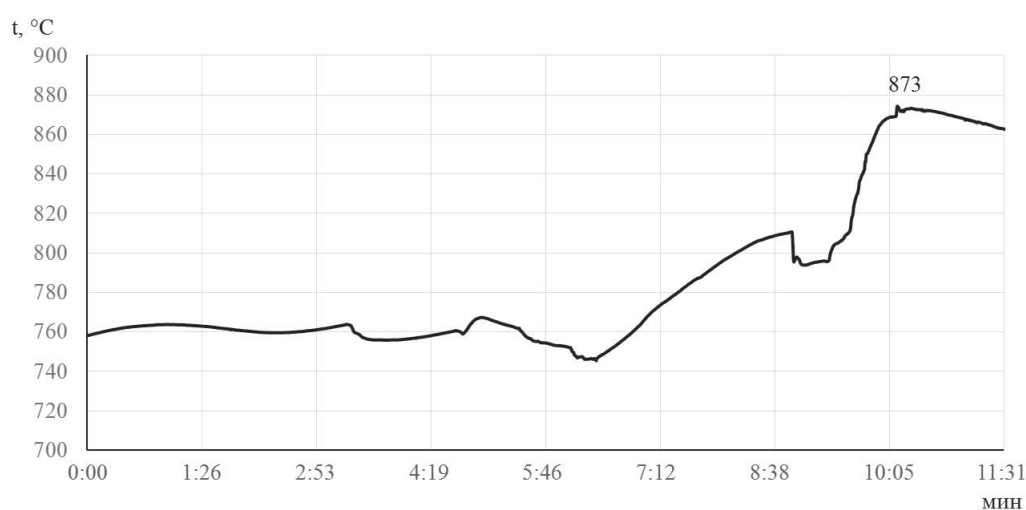


Рис. 2. Изменение температуры в расплаве АК12 при обработке фреоном-12 совместно с солевой композицией ( $K_2TiF_6 + BaCO_3$ )

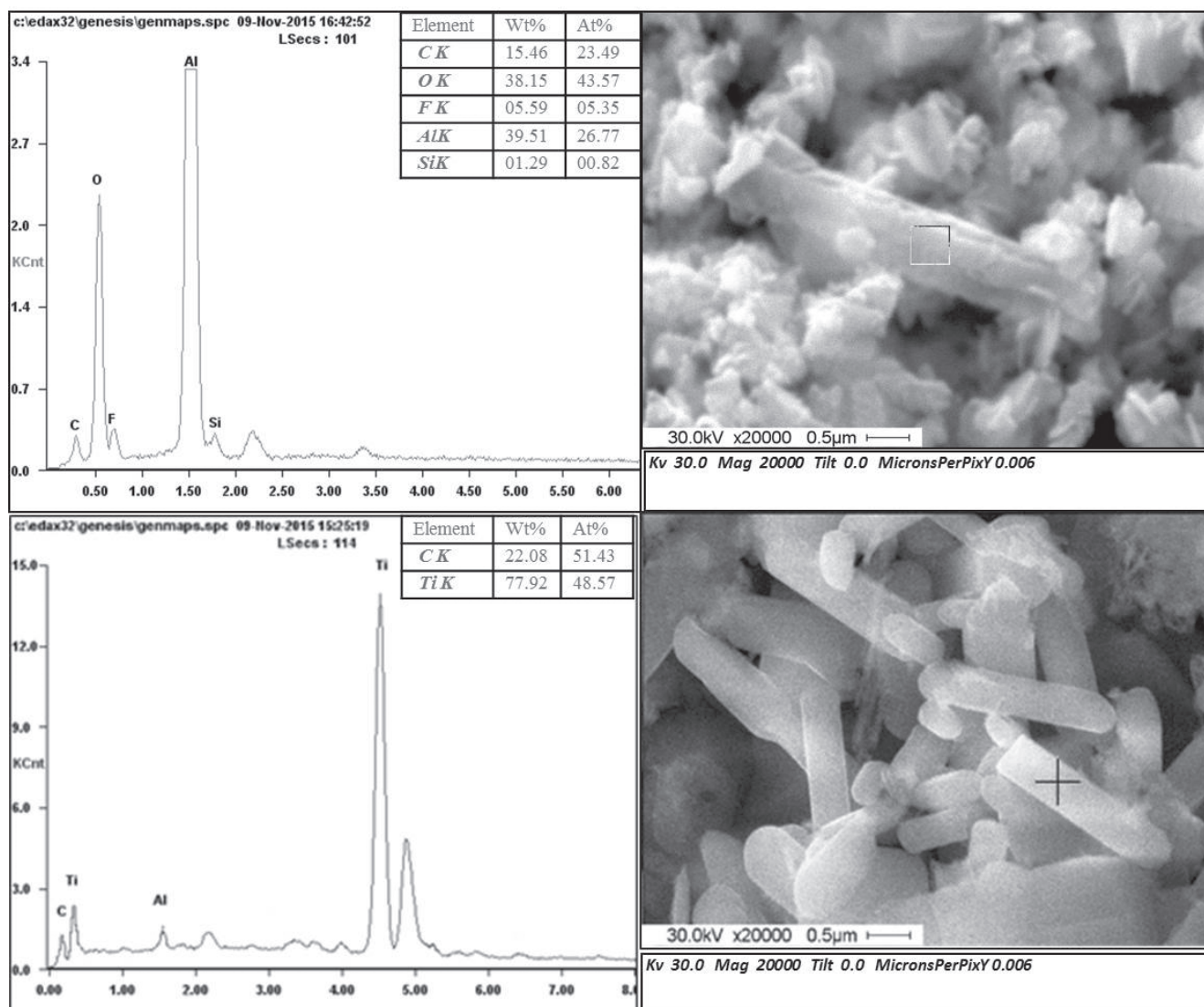


Рис. 3. Морфология поверхности и элементный состав образца

стной обработке фреоном и солевой композицией ( $K_2TiF_6 + BaCO_3$ ) происходит образование в расплаве тугоплавких соединений, близких по своему составу к карбидам алюминия и титана. Образующиеся соединения выделяются в расплаве при кристаллизации в мелкодисперсной форме и образуют множество центров кристаллизации за счет подобия их кристаллического строения с алюминием.

Эффективность обработки расплава фреоном во многом обусловлена тем, что, согласно ранее проведенным исследованиям [6, 7], фреон оказывает рафинирующее воздействие на расплав силумина.

### Выводы

На основании полученных результатов сделан вывод, что обработка расплава силумина углеродосодержащим газом фреоном оказывает модифицирующее воздействие на структуру сплава, а также усиливает модифицирующий эффект для большинства рассмотренных флюсовых композиций. В ре-

зультате обработки сплава АК12 фреоном-12 механические свойства опытных сплавов значительно повышаются, наблюдается модифицированная структура. Перспективной является обработка сплава АК12 фреоном и солевой композицией ( $BaCO_3 + K_2TiF_6$ ), оказывающая комплексное модифицирующее воздействие на различные структурные составляющие литейных алюминиевых сплавов. Анализ результатов проведенной работы показал перспективность исследований по применению в качестве модификаторов силуминов углеродосодержащих материалов, в частности газа из группы фреонов.

*Исследование проводится при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» в рамках договора №7166ГУ2/2015 от 03.08.2015 года.*

## Библиографический список

1. *Ионов В.И., Алешина О.Н.* Оптимизация планирования работ по управлению качеством изготовления продукции на самолетостроительном предприятии. // Вестник Московского авиационного института. 2001. Т.8. №1. С. 87-96.
2. *Изотов В.А., Чибирнова Ю.В.* Способ модифицирования алюминия и алюминиево-кремниевых сплавов (силуминов) углеродом / Патент RU № 2538850. Бюл. №1, 10.01.2015. С. 5.
3. *Петров И.А., Ряховский А.П., Моисеев В.С., Бобрышев Б.Л., Шляпцева А.Д.* Перспективы использования углеродосодержащего материала для обработки силуминов // Литейщик России. 2016. №1. С. 28-32.
4. *Луц А.Р., Амосов А.П., Ермошкин А.А., Ермошкин А.А., Никитин К.В., Тимошкин И.Ю.* Самораспространяющийся высокотемпературный синтез высокодисперсной фазы карбида титана из смесей порошков в расплаве алюминия// Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. №3. С. 28-35.
5. *Bin Yang, Guoxiang Chen, Jishan Zhang.* Effect of Ti/C additions on the formation of Al<sub>3</sub>Ti of in situ TiC/Al composites. Materials & Design. 2001. Vol. 22, pp. 645-650.
6. *Томович С., Томович М., Ачимович З., Гулишия З.* Влияние дегазации алюминиевых сплавов газовой смесью азота и фреона на качество отливок // Литейное производство. 1994. №7. С 12-13.
7. *Маленьких А.Н., Горбунов В. А., Голубцов С. В., Тенляков Ф. К.* Способ рафинирования алюминия и его сплавов/ Авт.свид. СССР №956587, № 3005122/22-02. 18.11.1982. №33. С.2.

## MODIFYING ADDITIVES COMPLEX EFFECT ON AK12 ALLOY STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

**Shlyaptseva A.D.\* , Petrov I.A.\*\* , Ryakhovskii A.P.\*\*\* , Moiseev V.S.\*\*\***

*Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

*\* e-mail: dimash881@yandex.ru*

*\*\* e-mail: Lumen-2007g@mail.ru*

*\*\*\* e-mail: castingtp@mati.ru*

### Abstract

The paper presents the study of the effect on AK12 alloy structure and mechanical properties while subjecting its melt to complex modifying treatment with carbon-bearing Freon12 gas and salt compounds.

Based on earlier obtained results, we selected K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>, BaCO<sub>3</sub> salt compounds and carbon (graphite) as modifying compounds. KA12 alloy processing with the selected compounds was performed both without and with its melt blowing-down by the above mentioned gas.

Mechanical tests results and microstructure analysis revealed that the Freon-12 blowing-down makes modifying impact on AK12 alloy. The highest mechanical properties, and refining of  $\gamma$ -solid solution dendrites and refining of silicon particles in an eutectic is observed at simultaneous treatment of an AK12 alloy by the modifying salts (BaCO<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> + C) together with Freon. The strength of the alloy equals to 176 MPa, and relative elongation equals to 9,40%.

Besides, the Freon blowing-down increases the modifying effect for the majority of considered flux

compounds. The alloy AK12 treatment with Freon and salts (BaCO<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>) is most perspective, compared to the alloy modified only by salts (BaCO<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>). The strength increased from 162 to 188 MPa, and elongation - from 7,70 to 9,01%.

Based on thermograms obtained while the melt treatment, surface morphology data and elementary composition of AK12 alloy treated with test compounds, we made a conclusion on the presence of carbon-bearing disperse particles similar in composition to aluminum and titanium carbides in treated with salt compounds (BaCO<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>) and Freon alloy. Those formed carbides can be additional crystallization centers in the melt due to dimensional and structural resemblance with aluminum crystal lattice.

Analysis of the results of the carried on research revealed the perspective of carbon-bearing materials, and Freon 12 in particular, implementation as aluminum-silicon alloy modifiers.

**Keywords:** silumins modification with freon, freon effect on aluminum alloys mechanical properties.

**References**

1. Ionov V.I., Aleshina O.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2001, vol. 8, no. 1, pp. 87-96.
2. Izotov V.A., Chibirnova Yu.V. *Patent RU 2013110263*, 10.01.2015.
3. Petrov I.A., Ryakhovskii A.P., Moiseev V.S., Bobryshev B.L., Shlyaptseva A.D. *Liteishchik Rossii*, 2016, no. 1, pp. 28-32.
4. Luts A.R., Amosov A.P., Ermoshkin A.A., Ermoshkin A.A., Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*, 2013, no. 3, pp. 28-35.
5. Bin Yang, Guoxiang Chen, Jishan Zhang. Effect of Ti/C additions on the formation of Al<sub>3</sub>Ti of in situ TiC/Al composites, *Materials & Design*, 2001, no. 22, pp. 645-650.
6. Tomovich S., Tomovich M., Achimovich Z., Gulishiya Z. *Liteinoe proizvodstvo*, 1994, no. 7, pp. 12-13.
7. Malen'kikh A.N., Gorbunov V.A., Golubtsov S.V., Teplyakov F.K. *Avtorskoe svidetel'stvo USSR 956587*, 07.09.1982.