

УДК 699.018.28

## ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

КАЛИНИНА Н. Е.<sup>1</sup>, к. т. н., проф.,  
 ВИЛИЦУК З. В.<sup>2</sup>, асп.,  
 КАЛИНИН А. В.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.,  
 НИКОЛАЙЧУК Т. Н.<sup>4\*</sup>, асп.,  
 ГОЛОВАТАЯ А. В.<sup>5</sup>, маг.

<sup>1,2,5</sup> Кафедра технологии производства, Государственное высшее учебное заведение «Днепропетровский государственный университет имени Олеся Гончара», ул. Научная, 10, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (095) 550 28 00, e-mail: [kalinina-ne@yandex.ru](mailto:kalinina-ne@yandex.ru)

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (066) 305 64 51, e-mail: [kalinina-ne@yandex.ru](mailto:kalinina-ne@yandex.ru)

<sup>4\*</sup> Кафедра технологии производства, Государственное высшее учебное заведение «Днепропетровский государственный университет имени Олеся Гончара», ул. Научная, 10, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (066) 925 97 27, e-mail: [pautina2727@mail.ru](mailto:pautina2727@mail.ru), ORCID: [0000-0003-1402-1817](https://orcid.org/0000-0003-1402-1817)

**Аннотация. Постановка проблемы.** В данное время актуальным является изучение особенностей структуры и свойств литейных алюминиевых сплавов, обработанных нанодисперсными модификаторами. Проведен анализ существующих модификаторов алюминиевых сплавов системы Al–Si. На основе классической теории модифицирования выбран тип тугоплавкого модификатора – порошок карбида кремния SiC размером частиц 50...100 нм. Разработана технология ввода модификатора в расплав. Проведены опытно-промышленные плавки алюминиевого сплава АЛ4, АЛ4С. **Научная новизна.** Установлены критерии выбора нанодисперсного модификатора SiC. Проложены термовременные параметры модифицирования. Получен эффект измельчения дендритной структуры модифицированных сплавов. Достигнута однородная мелкозернистая структура отливок из модифицируемого сплава АЛ4. Повышены технологические и механические свойства промышленных алюминиевых сплавов, снижена газонасыщенность,

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, нанодисперсный модификатор, отливка, свойства, структура

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

КАЛІНІНА Н. Є.<sup>1</sup>, к. т. н., проф.,  
 ВІЛИЦУК З. В.<sup>2</sup>, асп.,  
 КАЛІНІН А. В.<sup>3</sup>, к. т. н., доц.,  
 МИКОЛАЙЧУК Т. Н.<sup>4\*</sup>, асп.,  
 ГОЛОВАТА А. В.<sup>5</sup>, маг.

<sup>1,2,5</sup> Кафедра технології виробництва, «Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара», вул. Наукова, 10, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (095) 550 28 00, e-mail: [kalinina-ne@yandex.ru](mailto:kalinina-ne@yandex.ru)

<sup>3</sup> Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (066) 305 64 51, e-mail: [kalinina-ne@yandex.ru](mailto:kalinina-ne@yandex.ru)

<sup>4\*</sup> Кафедра технології виробництва, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, вул. Наукова, 10, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (066) 925 97 27, e-mail: [pautina2727@mail.ru](mailto:pautina2727@mail.ru), ORCID: [0000-0003-1402-1817](https://orcid.org/0000-0003-1402-1817)

**Анотація. Постановка проблеми.** Наразі актуальним стає вивчення особливостей структури та властивостей ливарних алюмінієвих сплавів, оброблених нанодисперсними модифікаторами. Проведено аналіз існуючих модифікаторів алюмінієвих сплавів системи Al–Si. На основі класичної теорії модифікування обрано тип тугоплавкого модифікатора – порошок карбиду кремнію SiC розміром частинок 50...100 нм. Розроблено технологію введення модифікатора в розплав. Проведено дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів АЛ4, АЛ4С. **Наукова новизна.** Встановлено критерії вибору нанодисперсного модифікатора SiC. Наведено термічно-часові параметри модифікування та ефект зміни дендритної структури модифікованих сплавів. Досягнуто однорідну дрібнозернисту структуру виливків та модифікованого сплаву АЛ4. Підвищено технологічні властивості промислових алюмінієвих сплавів, знижено газонасиченість, механічні властивості.

*Ключові слова:* алюмінієві сплави, нанодисперсний модифікатор, виливок, властивості, структура

## FEATURES OF INFLUENCE OF MODIFYING ON STRUCTURE AND PROPERTY OF FOUNDRY ALUMINIUM ALLOYS

KALININA N. E.<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,  
 VILISHCHUK Z.V.<sup>2</sup>, postgr.,  
 KALININ A.V.<sup>3</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.,  
 NIKOLAYCHUK T. N.<sup>4\*</sup>, postgr.,  
 GOLOVATAYA A. V.<sup>5</sup>, mag.

<sup>1,2,5</sup> Department of the production technology, The Dnipropetrovsk National University Oles Honchar, Nauchnaya Str., 10, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (095) 550 28 00, e-mail: [kalinina-ne@yandex.ru](mailto:kalinina-ne@yandex.ru)

<sup>3</sup> Department of the materials science and processing of materials, The Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky Str., 24-a, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (066) 305 64 51, e-mail: [kalinina-ne@yandex.ru](mailto:kalinina-ne@yandex.ru)

<sup>4\*</sup> Department of the production technology, The Dnipropetrovsk National University Oles Honchar, Nauchnaya Str., 10, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (066) 925 97 27, e-mail: [pautina2727@mail.ru](mailto:pautina2727@mail.ru), ORCID: 0000-0003-1402-1817

**Annotation. Raising of problem.** The purpose of this work is studying of features of structure and properties of the foundry aluminum alloys processed by nanodisperse modifiers. The analysis of the existing modifiers of aluminum alloys of Al–Si system is carried out. On the basis of the classical theory of modifying the type of the refractory modifier – carbide silicon as SiC of particles in size 50...100 nanometers it was offered. The technology of input of the modifier in fusion is developed. It is carried out industrial experiences of melting of an aluminum alloy AL4, AL4S. **Scientific novelty.** Criteria of a choice of the nanodispersible SiC modifier are established. Thermotemporary parameters of modifying are laid. The effect of crushing of dendrit's structure of the modified alloys is received. The uniform fine-grained structure of castings from the modified AL4 alloy is reached. Technological properties the industrial aluminum alloys are increased, mechanical properties is reduced.

*Keywords:* aluminum alloys, nanodispersion modifier, casting, properties, structure

### Постановка проблемы

Повышение качества и свойств изделий ответственного назначения не может быть решено без разработки новых и усовершенствованных существующих технологических процессов производства сплавов на основе алюминия. К отливкам из алюминиевых сплавов, входящих в состав турбонасосных агрегатов, насосов топлива предъявляют требования, сочетающие герметичность, низкую пористость, высокий комплекс механических свойств [1–3]. При получении литейных алюминиевых сплавов важным этапом является процесс плавки и обработки расплавов. Именно на этих стадиях эффективно используются операции модифицирования и рафинирования расплавов [2; 5; 6].

Однако отсутствие адаптации отливок к механической обработке сдерживает широкое применение алюминиевых сплавов в качестве конструкционных материалов. Низкая технологичность объясняется наличием в сплавах хрупких и труднорастворимых фаз: FeAl<sub>3</sub>, Mg<sub>2</sub>Si, MgZn<sub>2</sub>, возникающих в виде крупных кластеров и формирующих непрерывную сетку [1]. Эти хрупкие фазы являются причиной образования трещин при литье слитков и фасонных отливок. Кроме того, они способствуют замедлению диффузионных процессов растворения интерметаллидов при гомогенизации отливок [3].

Большим недостатком является высокая газонасыщенность литейных сплавов.

Развитие современных технологий требует создания новых материалов и усовершенствования существующих сплавов. Одним из эффективных способов повышения качества отливок, измельчения зерна и получения однородной структуры является модифицирование [5].

Промышленные предприятия применяют модифицирование литейных алюминиевых сплавов солями натрия, что способствует дифференциации эвтектики Al–Si. Однако легкоплавкие соли натрия не экологичны и не применимы для обработки больших масс расплавов.

Перспективным направлением при модифицировании является использование дисперсных тугоплавких модификаторов: карбидов, нитридов, боридов, чистых металлов с размером частиц 0,1...1 мкм [9–11]. При модифицировании литейных алюминиевых сплавов дисперсными частицами карбида кремния размером до 1 мкм отмечено повышение технологических и механических свойств сплавов и коррозионной стойкости [3; 7].

Теоретические основы модифицирования изложенных в основополагающих работах В. Е. Неймарка, М. В. Мальцева [2]. В настоящее время существует несколько теорий модифицирования, они объясняют определенные стороны процесса модифицирования алюминиевых сплавов, но не характеризуют его полностью. Это обусловлено сложностью процесса и его зависимостью от условий плавки и литья, а также

Таблиця 1

**Химический состав литейных алюминиевых сплавов / The chemical composition of cast aluminum alloys**

Сплавы	Содержание элементов, % масс.							
	Al	Si	Zn	Mg	Sb	Mn	Cu	Fe
АЛ4	основа	10,5	0,3	0,35	–	0,50	0,3	0,4
АЛ4С	основа	10,0	0,3	0,25	0,25	0,35	0,3	0,8
АЛ4Д	основа	7,5	0,3	0,45	–	–	1,2	1,0

В промышленных условиях были опробованы порошки титана, нитрида титана, карбида кремния для модифицирования сплавов АЛ4 (АК9ч), АЛ4С, АЛ4Д. С целью повышения качества и технологичности многокомпонентных сплавов системы Al–Si, улучшения механических свойств проведено модифицирование расплавов тонкодисперсными порошками карбида кремния модификации  $\beta$ -SiC размерами 50...100 нм.

Исследуемые сплавы являются многокомпонентными, что приводит к возможности упрочнения твердого раствора алюминия растворенными легирующими элементами, а также выделению из пересыщенного твердого раствора интерметаллидных фаз, что создает эффект упрочнения при последующем старении. Получаемый модификатор представляет собой тугоплавкие карбиды кремния, которые не растворяются в расплаве, а служат дополнительными центрами кристаллизации. Оптимальное количество вводимого модификатора определено экспериментально на лабораторных плавках и колебалось от 0,07 до 0,1 % от массы расплава.

Таблиця 2

**Влияние дисперсных добавок модификатора SiC на зеренную структуру сплава АЛ4 / The impact modifier additives dispersed SiC on the grain structure of the alloy AL4**

Кол-во добавок в % от массы расплава	Размер зерна сплава, мкм	
	до модифицирования	после модифицирования
0,03	160	95
0,07	130	72
0,10	150	90

В таблице 2 приведены данные влияния качества модификатора на размер зерна и пористость отливок.

Микроструктура сплава АК9ч представляет собой  $\alpha$ -Al твердый раствор, небольшое количество эвтектики и различные интерметаллидные фазы AlSb, MgZn<sub>2</sub>, AlFeSi, CuAl<sub>2</sub>, которые выделяются из

влиянием неконтролируемых примесей и взаимодействием вводимых компонентов, которые могут как усиливать, так и ослаблять действие модификаторов.

Все вещества, имеющие меньшую электроотрицательность и меньший эффективный ионизационный потенциал  $U_{Me}$ , чем металлическая основа сплава, будут иметь модифицирующее влияние на процесс кристаллизации [7; 9; 11].

Материалы, имеющие большее значение  $U_{Me}$  – металлической основы сплава, будут иметь отрицательное воздействие. Это происходит потому, что чем ниже значение ионизационного потенциала, тем легче элемент отдает свои валентные электроны матрице и наоборот. Фактор, который характеризует способность вещества влиять на процесс кристаллизации, следует рассматривать как фактор растворимости примесей в матрице. Модификатор должен располагаться на границе кристаллов и кластеров, но не входить в состав матричного сплава.

Модификатор не должен образовывать свои собственные кластеры. Элемент, имеющий свойства модификатора, должен иметь низкую растворимость в твердом состоянии и ограниченную в жидком. На основе коэффициентов изменения активности различных элементов наиболее мощными модификаторами алюминия и его сплавов являются: Ge, La, Sr, Ti, Sc и их соединения. Изучено влияние переходных металлов: Hf, Ta, Ti, V, Nb, Zr на свойства алюминиевых сплавов [4]. Установлено что элемент является эффективным модификатором, если на диаграмме состояния он имеет наибольшее значение интервала кристаллизации.

В настоящее время опубликовано достаточное число качественных работ, посвященных модифицированию дисперсными частицами тугоплавких соединений. В дисперсных системах отражаются особенности состояния поверхности, поскольку доля поверхностных атомов в дисперсных частицах является преобладающей. В связи с изложенным, тематика представленной работы является актуальной для получения качественных отливок в машиностроении.

### Результаты исследования и их обсуждение

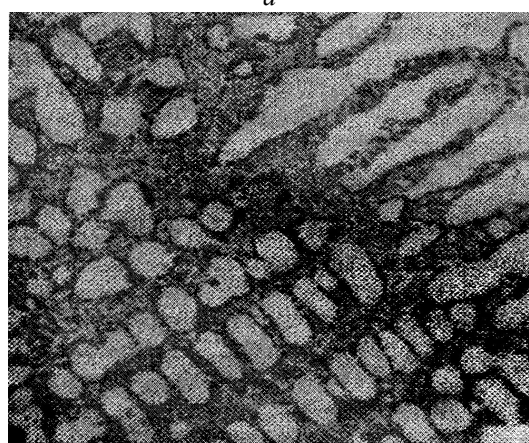
С целью повышения качества отливок из алюминиевых сплавов системы Al–Si в данной работе проведены опытно-промышленные плавки сплавов АЛ4 (АК9ч), АЛ4С, АЛ4Д. Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов приведен в таблице 1.

Как показано в работах [10–12; 13], наиболее эффективным модификатором алюминиевых сплавов являются порошковые тугоплавкие композиции на основе карбида SiC размером менее 1 мкм.

пересыщенного твердого раствора при последующем старении.



*a*



*б (b)*

*Рис. Микроструктура сплава АЛ4 (АК9ч) до (а) и после (б) модифицирования ( $\delta_0$ );  $\times 400$  / Fig. The microstructure of the alloy AL4 (AK9ch) to (a) and after (b) modifying ( $\delta_0$ );  $\times 400$*

Поскольку растворимость водорода в жидком расплаве алюминия выше, чем в твердом состоянии, это – основная причина газовой пористости при затверждении отливки. Для уменьшения пористости проводили рафинирование расплава гексахлорэтаном. Для устранения вторичной пористости при термической обработке отливки защищали титановой стружкой.

В работе предложен технологический процесс модифицирования алюминиевых сплавов АЛ4 и АЛ4С нанодисперсными порошками карбида кремния. Дисперсный порошок  $\beta$ -SiC был выбран исходя из соответствия кристаллических решеток Al и SiC (ГПУ решетка) и малого различия атомных радиусов Al и SiC. Порошок модификации  $\beta$ -SiC получен методом плазмохимического синтеза. Средний гранулометрический состав модификатора составил 100 нм. Для удобства подачи в расплав использован таблетированный модификатор.

Были определены технологические свойства отливок до и после модифицирования.

Жидкотекучесть определяли методом прутковой пробы. В результате модифицирования повышена жидкотекучесть сплавов АЛ4С и АЛ4 на 5...11 %. Содержание газов в сплавах определяли с помощью технологических проб. При понижении температуры жидкого металла в форме понижается растворимость газов и тем самым увеличивается количество пузырьков газа. Сплавы АЛ4 и АЛ4С доэвтектического и эвтектического состава обладают хорошей жидкотекучестью, что уменьшает вероятность образования в отливках газовых раковин.

Сплавы выплавляли в электрической печи сопротивления САТ – 0,15 емкостью 150 кг. После расплавления лигатур А–Mg, Al–Mn сплавы перегревали до температуры 720...760 °С и подвергали модифицированию. Навеску модификатора вводили в нижнюю часть тигля и механически перемешивали. Результаты оценки газосодержания образцов (табл. 3) показали, что модифицирование сплавов обеспечивает низкое газосодержание, соответствующее 1 баллу пористости отливок из алюминиевых сплавов по ДСТУ 2839-94.

Работы, проведенные в промышленных условиях, показали повышение механических свойств модифицированных литейных алюминиевых сплавов АЛ4-М и АЛ4С до 270 МПа, что на 25 % выше прочностных свойств немодифицированных сплавов.

*Таблица 3*

**Результаты определения газосодержания и жидкотекучести сплавов / The results of determination of gas content and the fluidity alloys**

Исследованные сплавы	Пористость	Жидкотекучесть, мм
АЛ4	3	385
АЛ4-М*	1	377
АЛ4С	1	225
АЛ4Д	1	250

АЛ4-М\* – модифицированный.

**Выводы**

1. Обоснован выбор типа модификатора литейных алюминиевых сплавов – порошковой композиции карбида кремния модификации  $\beta$ -SiC средним размером частиц 50...100 нм. Проведены промышленные плавки сплавов АЛ4 (АК9ч), АЛ4С, АЛ4Д с применением таблетированного модификатора.

2. Изучены технологические свойства сплавов. В модифицированных сплавах снижена пористость с 3-го до 1-го балла и повышена жидкотекучесть на 5...11 %.

3. В результате модифицирования получена однородная дисперсная структура отливок и достигнуто повышение прочностных свойств на

25 % по сравнению с немодифицированным состоянием.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы и конструкционное деформирование / И. Н. Фридляндер. – Москва : Metallurgiya, 1979. – 365 с.

Fridljander I. N. *Aljuminievyje deformiruemye konstrukcionnye splavy* [Aluminum alloys and structural deformation]. Moscow : Metallurgy Publ., 1979. 365 p. (in Russian).

2. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – Москва : Metallurgiya, 1964. – 214 с.

Mal'cev M. V. *Modificirovanie struktury metallov i splavov* [Modifying the structure of metals and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1964. 214 p. (in Russian).

3. Елагин В. И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами / В. И. Елагин. – Москва : Metallurgiya, 1975. – 125 с.

Yelagin V. I. *Ligirovanie deformiruemyh aljuminievykh splavov perehodnymi metallami* [Doping wrought aluminum alloys with transition metals]. Moscow : Metallurgy Publ., 1975. 125 p. (in Russian).

4. Куцова В. З. Вплив легування комплексом GeP на структуру та властивості сплавів системи Si–Ge / В.З. Куцова, О. А. Носко, О. В. Олійник // Вісник ДНУ. – 2010. – Вип. 74. – С. 120–126.

Kutsova V. Z. O., Nosko A., Oliynik V. O. *Vplyv leguvannya kompleksom GeP na strukturu ta vlastivosti splaviv v sistemah Si–Ge* [Influence of an alloying the GeP complex on structure and properties of alloys of S–Ge system]. Herald of DNU, 2010. Vol. 74. Pp. 120–126. (in Ukrainian).

5. Іщенко А. Я. Зварювання сучасних конструкцій із алюмінієвих сплавів / А. Я. Іщенко, Т. М. Лабур. – Київ : Наукова думка, 2013. – 405 с.

Ishchenko A. J., Labur T. M. *Zvaryvannya suchasnykh konstruksiy z aljuminievykh splaviv* [Welding modern designs of aluminum alloys]. Kyiv : Scientific Thought Publ., 2013. 405 p. (in Ukrainian).

6. Калинина Н. Е. Особенности модифицирования алюминиевых сплавов Al–Mg / Н. Е. Калинина, З. В. Вилищук // Авиационно-космические материалы и технологии. – 2011. – № 7 (84). – С. 80–84.

Kalinina N. E., Vilishhuk Z. V. *Osobennosti modifitsirovaniya aljuminievykh splavov Al–Mg* [Modifying features aluminum alloys Al–Mg]. Aerospace Materials and Technologies. 2011. № 7(84). Pp. 80–84. (in Russian).

7. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Немененок. – Ленинград : Технопринт, 1999. – 272 с.

Nemenenok B. M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of complex

modification silumins]. Leningrad : Tehnoprint Publ., 1999. 272 p. (in Russian).

8. Богуслаев В. О., Качан О. Я., Калинина Н. Е. Авиационно-космичні матеріали та технології : підручник для вузів. – Запоріжжя : Motor Січ, 2010. – 385 с.

Bohuslaev V. O., Kachan O. J., Kalinina N. E. *Aviatsiyno-kosmichni materialy ta tekhnolohiyi* [Aviation space materials and technologies]. Zaporozh'ye : Motor Sich Publ., 2010. 385 p. (in Ukrainian).

9. Андриевский Р. А. Наноматериалы : концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Рос. хим. журнал. – 2002. – № 5. – С. 50–56.

Andrievskiy R. A. *Nanomaterialy : koncepcija i sovremennyye problemy* [Nanomaterials: concept and modern problems]. Moscow : Russian Chemical J. Publ., 2002. No. 5. Pp. 50–56. (in Russian).

10. Калинина Н. Е. Дисперсное модифицирование литейных алюминиевых сплавов / Н. Е. Калинина, О. А. Ковац // Вісник ДНУ. – 2007. – № 9 / 2. – С. 27–31.

Kalinina N. E., Kovats O. A. *Dispersning modifitsirovaniya liteynykh aljuminievykh splavov* [Tabletting particulate modification of cast aluminum alloys]. Herald of DNU, 2007. № 9 / 2. Pp. 27–31. (in Russian).

11. Патент 28570 України, МПК С22С/00. Склад для модифікування алюмінієвих сплавів / Ковац О. А., Калинина Н. Е., Ковац Д. А., Федючук О. К. : Заявка ДПВО Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова. № 200709846; заявл. 03.09.07; опубл. 10.12.07; Бюл. № 20, 8 с.

Patent 28570 Ukraine, MPK S22/00. *Sklad dlya modyfikuvannya aljuminievykh splaviv* [Ingredients for the modification of aluminum alloys]. O. A. Kovats, N. E. Kalinina, D. A. Kovats, O. K. Fedorchuk : Application DEPA Southern Machine-Building Plant named after A. Makarov. № 200709846; claimed. 03.09.07; published 10.12.07; bull. № 20, 8 p. (in Ukrainian).

12. Вилищук З. В. Влияние модифицирования на фазовый состав высокопрочных алюминиевых сплавов / З. В. Вилищук, Н. Е. Калинина / Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ПГАСА, 2010. – С. 39–44.

Vilishhuk Z. V., Kalinina N. E. *Vliyanie modifitsirovaniya na fazovyi sostav vysokoprochnykh aljuminievykh splavov* [Effect of modifying the phase composition of high strength aluminum alloys]. Construction, materials science, mechanical engineerin. Dnepropetrovsk : PSAEA, 2010. Pp. 39–44. (in Russian).

13. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва : Физматлит, 2005. – 426 с.

Gusev A. I. *Nanomateriali, nanostrukturi, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow : FIZMATLIT Publ., 2005. – 426 p. (in Russian).

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Е. А. Джуром (Украина); д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным. (Украина).*

Статья поступила в редколлегия 10.10.2015

Принята к печати 12.10.2015