

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПОРОШКОВЫХ ПСЕВДОЛИГАТУР $\text{Cu}-(\text{SiC}+\text{Si}_3\text{N}_4)$ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ И АРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2016 г. А.А. Кузина

Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева (Самарский университет)

Статья поступила в редакцию 10.06.15 г., доработана 22.05.16 г., подписана в печать 25.05.16 г.

Исследованы механическое смешивание и последующее уплотнение порошковой смеси, состоящей из порошка-носителя (электролитическая медь с размером частиц 20–100 мкм) и нанопорошковой композиции-модификатора (порошки карбида кремния (SiC) – 50±70 %, нитрида кремния (Si₃N₄) – 20±30 %, гексафторалюмината натрия (Na₃AlF₆) – 10±20 %) с размером частиц 70–100 нм, полученной по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Порошковые смеси содержали 2,5; 5; 10 и 15 % модификатора. Механическое смешивание осуществляли в течение 30–45 мин со скоростью 150 об/мин в планетарной мельнице «Пулверизетте-5». Проведен анализ смешивания исходных порошковых компонентов. Определены некоторые физико-технологические свойства полученных порошковых смесей – такие, как гранулометрический состав, плотность, насыпная масса, сыпучесть. Формирование брикетов – нанопорошковых псевдолигатур из порошковых смесей состава $\text{Cu}-(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$ с различным содержанием модификатора – осуществляли холодным прессованием в цилиндрической пресс-форме на гидравлическом прессе ПСУ-50 под давлением 85–310 МПа. Определены зависимости относительной плотности и пористости брикетов от давления прессования. Представлены микроструктуры прессованных псевдолигатур при максимальном давлении прессования. Полученные брикеты – нанопорошковые псевдолигатуры диаметром 25 мм, высотой до 2 мм, массой 5 г с относительной плотностью 53–85 % и пористостью 15–47 – предназначены для последующего ввода их в алюминиевый расплав с целью модифицирования.

Ключевые слова: нанопорошки, карбид кремния, нитрид кремния, порошок меди, механическое смешивание, прессование, плотность, пористость, модифицирование, порошковые псевдолигатуры.

Кузина А.А. – ассистент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета им. акад. С.П. Королева (Самарского университета) (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). E-mail: KuzinaAntonina@mail.ru.

Для цитирования: Кузина А.А. Получение нанопорошковых псевдолигатур $\text{Cu}-(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$ для модифицирования и армирования алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 5. С. 78–84. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-78-84.

Kuzina A.A.

The obtaining nanopowder pseudo-ligatures $\text{Cu}-(\text{SiC}+\text{Si}_3\text{N}_4)$ for modification and reinforcement of aluminum alloys

The paper studies mechanical mixing and subsequent compaction of a powder mixture consisting of a powdered carrying agent (electrolytic copper having particles size of 20–100 μm) and a nanopowder modifying composition (silicon carbide powders (SiC) – 50±70 %, silicon nitride (Si₃N₄) – 20±30 %, sodium hexafluoroaluminate (Na₃AlF₆) – 10±20 %) having particles size of 70–100 nm, obtained using azide self-propagating high-temperature synthesis technology. Modifying agent content in powder mixtures was 2,5, 5, 10 and 15 %. Mechanical mixing was carried out for 30–45 min at a rate of 150 rpm using the «Pulverizette-5» planetary mill. The study analyzes intermixing of initial powder components. It determines some physical and technological properties of powder mixtures obtained, such as granulometric composition, density, bulk mass, flowability. Nanopowder pseudo-ligatures briquettes are formed of $\text{Cu}-(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$ powder mixtures with various content of the modifying agent by cold pressing in a cylindrical press mold using the PSU-50 hydraulic press at a pressure of 85–310 MPa. The study determines dependencies of relative density and porosity of briquettes on compaction pressure. It presents microstructures of pressed pseudo-ligatures at the maximum compaction pressure. Obtained nanopowder pseudo-ligatures briquettes with a diameter of 25 mm, up to 2 mm in height, weighing 5 g, with a relative density of 53–85 % and porosity of 15–47 are intended for subsequent introduction into aluminum melt for further modification.

Keywords: nanopowders, silicon carbide, silicon nitride, copper powder, mechanical mixing, compaction, density, porosity, modification, powdered pseudo-ligatures.

Kuzina A.A. – assistant of the Department of metal technology and aviation materials, Samara National Research University (Samara University) (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: KuzinaAntonina@mail.ru.

Citation: Kuzina A.A. Poluchenie nanoporoshkovykh psevdoligatur $\text{Cu}-(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$ dlya modifitsirovaniya i armirovaniya alyuminievykh splavov. Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya. 2016. No. 5. P. 78–84. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-5-78-84.

Введение

Получение качественных слитков и отливок композиционных алюминиевых сплавов определяется качеством исходных шихтовых материалов и особенно лигатур, используемых для эффективного легирования, модифицирования и армирования. Выбор способа производства лигатуры зависит от объема производства, ее требуемого качества, назначения, наличия плавильно-литейного оборудования и т.д. [1]. Лигатуры в сплавы можно вводить в твердом или жидком виде. В первом случае она используется наиболее широко (в виде чушек, прутков, гранул или брикетов-псевдолигатур), так как ее загрузка осуществляется на подину печи или поверх всей шихты, поэтому в процессе плавления лигатура не скапливается в одном месте, а почти равномерно распределяется по объему расплава.

Существуют различные способы получения лигатур для модифицирования металлов и сплавов [1–3]: сплавление чистых компонентов, восстановление легирующего металла из его соединений, метод порошковой металлургии и т.д. Последний вариант (смешивание порошков металлов и сплавов с последующим прессованием) позволяет точно дозировать содержание легирующих элементов в сплаве [4–6]. Рациональное смешивание порошков, правильный подбор режимов деформирования порошковых смесей и способов последующего ввода полученных псевдолигатур в расплав алюминиевых сплавов или алюминия различной степени чистоты обеспечивают необходимый комплекс свойств композиционных сплавов на алюминиевой основе [7, 8].

Модифицирование путем ввода в расплавы брикетов-псевдолигатур, содержащих тугоплавкие частицы, позволяет изменить зеренную структуру сплава и повысить механические и эксплуатационные характеристики материалов [1]. Так, за счет добавки в расплав 1 % наночастиц SiC возможно такое же возрастание степени деформации сплава в твердом состоянии, как и при использовании 10 % микрочастиц SiC. Однако для обеспечения надежного ввода наночастиц SiC в алюминиевый расплав рекомендуется совмещать данную операцию с ультразвуковой обработкой [9, 10].

В работах [11, 12] подтверждается, что известные способы непосредственного ввода в металлические расплавы порошкообразных модификаторов невозможны в случае использования нанопорошков,

так как наночастицы являются очень активными, легко слипаются, практически не смачиваются жидким расплавом и образуют в воздухе пылевидную взвесь, которая при определенных условиях способна к самовозгоранию и взрывоопасна.

Традиционные технологии получения алюминиевых композиционных сплавов, имеющие такие недостатки, как сложность, длительность, энергоемкость, часто и экологическая вредность, не позволяют также управлять процессом формирования структуры сплавов в полном объеме. В свою очередь, большими функциональными возможностями, доступностью и относительной простотой исполнения отличается метод получения композиционных Al-сплавов посредством модифицирования алюминиевых сплавов нанопорошковыми псевдолигатурами, состоящими из металлического порошка (носителя) и нанопорошка (модификатора). Так, нанопорошки, главным образом карбиды, нитриды, карбонитриды и т.д., вводятся в расплавы в виде прутков, отпрессованных из композиции «частицы алюминия (гранулы, сечка из алюминиевой проволоки) и частицы нанопорошка» с содержанием наночастиц до 2,7 %. Однако такого количества тонкодисперсных включений фазы-упрочнителя, равномерно распределенных между частицами металла, для получения композита с необходимыми свойствами является недостаточным [11, 12].

Цель данной работы — исследование технологии получения брикетов-псевдолигатур, состоящих из медного порошка-носителя и смеси нанопорошков модифицирующей фазы (SiC + Si₃N₄) при увеличенном содержании последней.

Методика исследований

Исследовали уплотнение порошковой смеси, состоящей из тугоплавких соединений SiC и Si₃N₄ и металлического (Cu) порошка-носителя. Свойства компонентов приведены в табл. 1.

В качестве носителя псевдолигатуры был выбран порошок меди с размером частиц 20–100 мкм (рис. 1, а), имеющей высокую плотность (8920 кг/м³) по сравнению с алюминиевым расплавом (2700 кг/м³) и используемой в качестве легирующего компонента для алюминиевых сплавов.

Функцию ультрадисперсного модифицирующего порошка выполняла композиция порошков карбида кремния (SiC) — 50÷70 %, нитрида кремния (Si₃N₄) — 20÷30 %, гексафторалюмината на-

Таблица 1
Свойства компонентов псевдолигатуры [15, 16]

Элемент, химическое соединение	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ К ⁻¹
Cu	1083	8920	110	16,6
SiC	2830	3170	394	4,7
Si ₃ N ₄	1900	3200	200	2,8

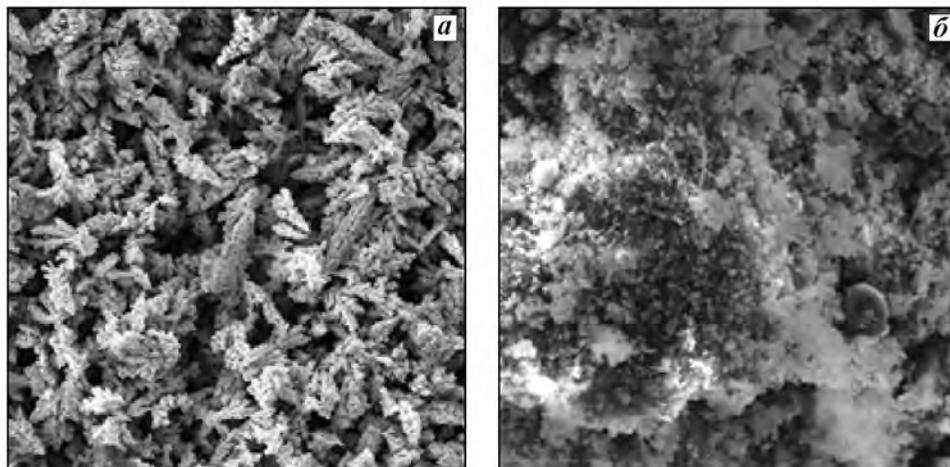


Рис. 1. Микрофотографии поверхности частиц (×500, метод РЭМ)
а – порошок меди; б – порошковая смесь SiC + Si₃N₄

трия (Na₃AlF₆) — 10±20 %, полученных по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, с размерами частиц 70—100 нм (см. рис. 1, б). [13, 14]. В данной порошковой смеси криолит Na₃AlF₆ является типичным флюсом для рафинирования и модифицирования расплавов алюминиевых сплавов, он может способствовать введению керамических микро- и нанопорошков в расплав алюминия, а также защите расплава от окисления и насыщения водородом.

Механическое смешивание проводили в планетарной мельнице «Пульверизетте-5» в течение 30—45 мин со скоростью 150 об/мин. В качестве мелющих тел использовали стальные шары диаметром 20 мм. Соотношение масс шаров и порошковой смеси составляло 10 : 1. Для лучшего перемешивания планетарную мельницу заполняли на 1/3 объема. Однородность смешивания оценивали с помощью произвольно взятых проб — шихту считали однородной, если не менее 95 % этих проб имели почти одинаковые химический и гранулометрический составы.

Гранулометрический состав порошков определяли на лазерном анализаторе размера частиц «Analysette 22 Compact» (Германия), химический

состав — с помощью энергодисперсионного детектора микрорентгеноспектрального анализа «INCAx-act» на микроскопе «Tescan Vega SB» (Чехия), насыпную массу порошков — волюмометром (Россия), текучесть порошков — методом Холла.

Для формирования псевдолигатуры из порошковой смеси Cu—(SiC + Si₃N₄) применяли холодное прессование. Одноосное уплотнение смеси проводили в цилиндрической пресс-форме с внутренним диаметром 25 мм, высота брикетов составляла 1,5—2,0 мм, масса — 5 г. Давление прессования изменяли от 85 до 310 МПа.

Относительную плотность полученных псевдолигатур рассчитывали по формуле [6, 17]

$$\theta = (\gamma_{\text{прес}} / \gamma_{\text{комп}}) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{прес}}$ — расчетная плотность прессовки, г/см³; $\gamma_{\text{комп}}$ — плотность компактного материала, г/см³.

Расчетную плотность прессовок определяли методом гидростатического взвешивания [18]:

$$\gamma_{\text{прес}} = \rho_{\text{в}} G_{\text{воз}} / (G_{\text{воз}} - G_{\text{в}}), \quad (2)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды при комнатной темпера-

туре, г/см^3 ; $G_{\text{воз}}$ и $G_{\text{в}}$ — масса прессовки соответственно на воздухе и в воде, г.

Для вычисления компактной плотности гетерогенной смеси нескольких порошков использовали уравнение [18]:

$$\gamma_{\text{комп}} = 100[(c_1/\gamma_1) + (c_2/\gamma_2) + (c_3/\gamma_3)]^{-1}, \quad (3)$$

где c_1, c_2, c_3 — концентрации компонентов порошковой смеси, мас.%; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — их компактные плотности, г/см^3 .

Пористость полученных брикетов рассчитывали по формуле [17, 18]

$$P = 100 - \theta, \quad (4)$$

где P — пористость материала, %; θ — относительная плотность, %.

Результаты и их обсуждение

Химический состав и некоторые физические и технологические свойства полученных

после размолва смесей порошков представлены в табл. 2 и 3.

При одинаковых режимах механического смешивания с увеличением содержания дисперсных включений ($\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4$), равномерно распределенных между Cu -частицами, отмечается уменьшение среднего размера порошковых частиц в исследуемых композициях (см. табл. 3). Наибольшее значение плотности гетерогенной смеси порошков в компактном состоянии имеет состав $\text{Cu}-2,5\%(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$, что объясняется меньшей массовой концентрацией фазы-упрочнителя в порошковой смеси. С этим же фактором связано и большее значение насыпной массы у этого состава. Однако все исследуемые порошковые композиции не обладают текучестью, поэтому после прессования в брикетах наблюдается незначительная неоднородность по плотности.

На рис. 2 представлены микрофотографии частиц порошковых смесей исследуемых составов, полученных после смешивания.

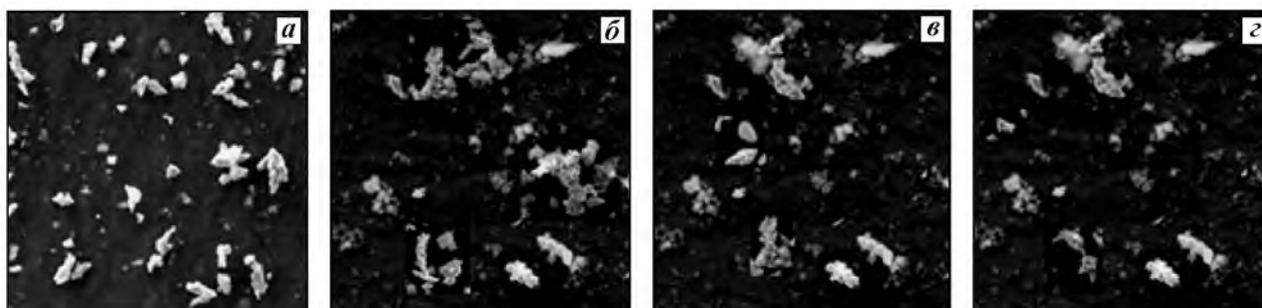


Рис. 2. Микрофотографии частиц порошковой смеси $\text{Cu}-x(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$ в насыпном состоянии при различных содержаниях модификатора ($\times 2000$, метод РЭМ)
 $x, \%$: а — 2,5, б — 5, в — 10, г — 15

Таблица 2

Химический состав, мас.%, исследуемых порошковых смесей $\text{Cu}-x(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$

$x, \%$	C	O	Al	Si	Cu	F	N	Na
2,5	4,14	1,16	0,72	2,08	91,86	—	—	0,04
5	8,15	2,11	1,8	4,11	78,51	1,74	3,52	0,06
10	14,74	2,49	1,48	8,76	64,52	3,22	4,69	0,1
15	18,94	3,73	2,41	12,09	53,06	4,06	5,59	0,12

Таблица 3

Физические и технологические свойства порошковых смесей $\text{Cu}-x(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$

$x, \%$	Средний размер частиц, мкм	Плотность, г/см^3	Насыпная масса, г/см^3	Текучесть, г/с
2,5	45–80	8,54	2,06	0
5	41–80	8,19	1,72	0
10	30–60	7,57	1,51	0
15	25–60	7,04	1,31	0

В процессе смешивания происходит изменение формы порошковых частиц. Так, если частицы исходной порошковой меди имеют дендритную форму (см. рис. 1, а), а порошковой композиции (SiC + Si₃N₄) — иррегулярные очертания (см. рис. 1, б), то после смешивания в планетарной мельнице в полученной смеси наблюдаются частицы осколочной формы и иррегулярных очертаний, а также незначительные скопления отдельных конгломератов (рис. 2).

Согласно произвольно взятым пробам на химический и гранулометрический составы (см. табл. 2 и 3), порошковые компоненты почти равномерно распределены по объему полученной порошковой смеси.

На рис. 3 представлены зависимости относительной плотности компактов (θ) из порошковых смесей состава Cu—(SiC + Si₃N₄) от давления прессования (P).

Ввиду малых размеров прессовок в данном случае можно пренебречь потерями на внешнее трение и сверхдавление. Согласно рис. 3, наибольшей плотностью обладает брикет состава Cu—

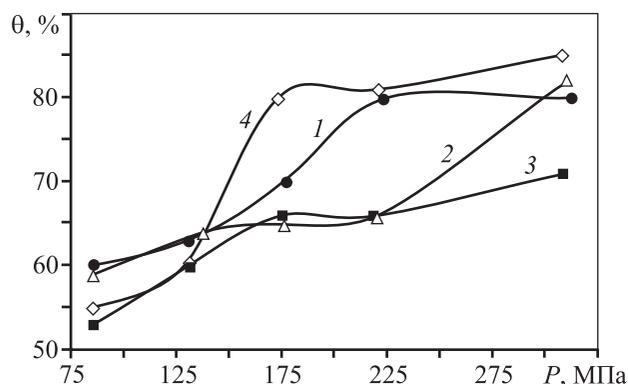


Рис. 3. Зависимость относительной плотности брикетов из порошковых смесей Cu—x(SiC + Si₃N₄) от давления прессования

Содержание модификатора x, %: 1 — 2,5, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 15

15%(SiC + Si₃N₄), полученный при прессовании с удельным давлением 310 МПа, максимальная пористость наблюдается в брикете Cu—10%(SiC + Si₃N₄) после прессования при $P = 85$ МПа.

В интервале $P = 85\div 130$ МПа наиболее интенсивное уплотнение имеет порошковая смесь состава Cu—5%(SiC + Si₃N₄), а при $P = 130\div 310$ МПа — композиция Cu—15%(SiC + Si₃N₄) со средним размером частиц 25—60 мкм.

Как известно, прессуемость порошков определяется их свойствами (размером частиц, формой, степенью наклепа и др.). При механическом смешивании исходных порошков «всухую» в центробежной планетарной мельнице наблюдаются незначительный наклеп порошковых частиц и газонасыщение. Таким образом, значительный рост сопротивления деформации при прессовании исследуемых порошков обусловлен наклепом меди, при этом содержание примесей в контактных участках существенно затрудняет разупрочнение порошкового материала.

На рис. 4 представлены микроструктуры псевдолигатур, прессованных при давлении 310 МПа. Как видно, в структурах прессованных материалов наблюдаются поры, что является необходимым условием в технологии получения псевдолигатур, поскольку наличие пор облегчает растворение брикета при последующем вводе его в расплав.

Заключение

Механическим смешиванием получены порошковые композиции на основе медного порошка-носителя, включающие от 2,5 до 15 мас.% модификатора (SiC + Si₃N₄). Определены их свойства — так, насыпная масса порошковой смеси, содержащей 2,5 мас.% (SiC + Si₃N₄), составила 2,06 г/см³ при плотности 8,54 г/см³, а в случае 15 мас.% моди-

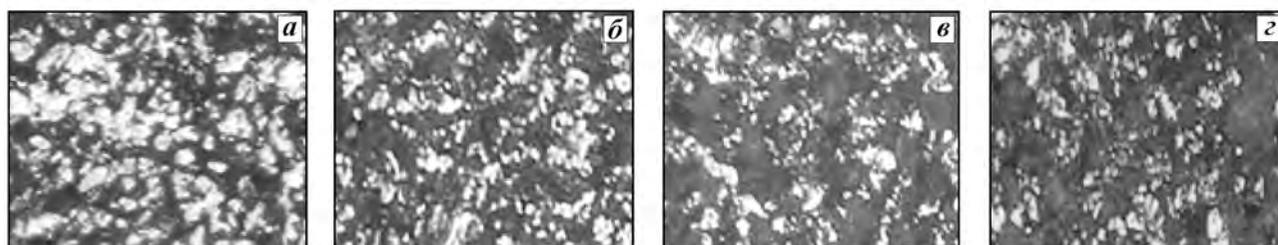


Рис. 4. Микроструктура прессованных псевдолигатур Cu—x(SiC + Si₃N₄) диаметром 25 мм и массой 5 г ($\times 500$, метод оптической микроскопии)

x, %: а — 2,5, б — 5, в — 10, г — 15

фикатора — соответственно $1,31 \text{ г/см}^3$ (насыпная масса) и $7,04 \text{ г/см}^3$ (плотность).

Из полученных порошков холодным прессованием ($P = 85\div 310 \text{ МПа}$) приготовлены нанопорошковые псевдолигатуры массой 5 г пористостью $15\text{—}47 \%$.

Применение нанопорошковых псевдолигатур $\text{Cu}-(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$, полученных методами порошковой металлургии путем изменения состава и соотношения компонентов и выбора технологии производства, для модифицирования и армирования алюминиевых сплавов позволяет создавать материалы с требуемыми свойствами.

Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013—2020 гг.

Автор выражает благодарность научному руководителю проф. А.П. Амосову за помощь в подготовке статьи.

Литература

1. *Напалков В.И., Махов С.В.* Легирование и модифицирование алюминия и магния. М.: МИСИС, 2002.
2. *Курганова Ю.А., Чернышова Т.А.* Разработка порошковых брикетов для изготовления литых композиционных материалов // *Физика и химия обраб. материалов.* 2007. No. 3. С. 57—61.
3. *Крушенко Г.Г., Фильков М.Н.* Способ получения модификатора для доэвтектических алюминиево-кремниевых сплавов: Пат. 2475334 (РФ). 2013.
4. *Nosova E.A., Kuzina A.A., Kuts A.V.* Development of the process of pseudo-ligatures manufacturing from aluminum and nickel powders for the modification of alloys // *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 698. P. 452—456. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.698.452.
5. *Альмов М.И.* Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. М.: Наука, 2007.
6. *Анциферов В.Н.* Порошковое материаловедение. Екатеринбург: УрО РАН, 2012.
7. *Surappa M.K.* Aluminium matrix composites: challenges and opportunities // *Sadhana.* 2003. Vol. 28. Pt. 1-2. P. 319—334.
8. *Mazaheri Y., Meratian M., Emadi R., Najarian A.R.* Comparison of microstructural and mechanical properties of Al—TiC, Al—B₄C and Al—TiC—B₄C composites prepared by casting techniques // *Mater. Sci. Eng. A.* 2013. Vol. 560. P. 278—287.
9. *Петрунин А.В., Панфилов А.В., Панфилов А.А.* О влия-

нии модифицирования наноразмерными тугоплавкими частицами на структуру и свойства алюмомагнитных композитов // *Литейн. пр-во.* 2009. No. 10. С. 17—20.

10. *Крушенко Г.Г.* Роль частиц нанопорошков при формировании структуры алюминиевых сплавов // *Металлургия машиностроения.* 2011. No. 1. С. 20—24.
11. *Крушенко Г.Г.* Средства и технологии увеличения содержания нанопорошков в алюминиевых модифицирующих прутках // *Нанотехника.* 2011. No. 3. С. 55—61.
12. *Крушенко Г.Г.* Модифицирование доэвтектического алюминиево-кремниевое сплава нанопорошком нитрида титана при литье сложнонагруженных деталей транспортного средства // *Технол. металлов.* 2008. No. 11. С. 5—7.
13. *Титова Ю.В., Амосов А.П., Ермошкин А.А., Марков Ю.М., Хусаинова Т.Н., Попова А.В.* Получение нанопорошка карбида кремния и композиции на его основе по азидной технологии СВС // *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2013. No. 3. С. 43—48.
14. *Амосов А.П., Титова Ю.В., Майдан Д.А., Ермошкин А.А., Тимошкин И.Ю.* О применении нанопорошковой продукции азидной технологии СВС для армирования и модифицирования алюминиевых сплавов // *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2015. No. 1. С. 68—74. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1-68-74.
15. *Мальцев М.В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970.
16. *Михеев Р.С., Чернышова Т.А.* Дискретно армированные композиционные материалы системы Al—TiC (обзор) // *Загот. пр-ва в машиностроении.* 2008. No. 11. С. 44—53.
17. *Гопиенко В.Г., Смагоринский М.Е., Григорьев А.А., Беллавин А.Д.* Спеченные материалы из алюминиевых порошков. М.: Металлургия, 1993.
18. *Анциферов В.Н., Перельман В.Е.* Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов. М.: Изд. дом «Грааль», 2001.

References

1. *Napalkov V.I., Makhov S.V.* Legirovanie i modifitsirovanie alyuminiya i magniya [Alloying and modification of aluminum and magnesium]. Moscow: MISIS, 2002.
2. *Kurganova Yu.A., Chernyshova T.A.* Razrabotka poroshkovykh briketov dlya izgotovleniya litykh kompozitsionnykh materialov [Development of powder briquettes for manufacturing molded composite materials]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov.* 2007. No. 3. P. 57—61.

3. *Krushenko G.G., Fil'kov M.N.* Sposob polucheniya modifikatora dlya doevtekticheskikh alyuminievo-kremnievykh splavov [A method of obtaining a modifier for hypoeutectic aluminum-silicon alloys]: Pat. 2475334 (RF). 2013.
4. *Nosova E.A., Kuzina A.A., Kuts A.V.* Development of the process of pseudo-ligatures manufacturing from aluminum and nickel powders for the modification of alloys. *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 698. P. 452–456. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.452.
5. *Alymov M.I.* Poroshkovaya metallurgiya nanokristallicheskikh materialov [Powder metallurgy of nanocrystalline materials]. Moscow: Nauka, 2007.
6. *Antsiferov V.N.* Poroshkovoe materialovedenie [Powder material]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2012.
7. *Surappa M.K.* Aluminium matrix composites: challenges and opportunities. *Sadhana*. 2003. Vol. 28. Pt. 1-2. P. 319–334.
8. *Mazaheri Y., Meratian M., Emadi R., Najarian A.R.* Comparison of microstructural and mechanical properties of Al–TiC, Al–B₄C and Al–TiC–B₄C composites prepared by casting techniques. *Mater. Sci. Eng. A*. 2013. Vol. 560. P. 278–287.
9. *Petrinin A.V., Panfilov A.V., Panfilov A.A.* O vliyaniy modifikatsionnykh nanorazmernymi tugoplavkimi chastitsami na strukturu i svoystva alyumomatrichnykh kompozitov [The effect of modification of nanoscale particles in the refractory structure and properties of aluminum-matrix composites]. *Liteinoe proizvodstvo*. 2009. No. 10. P. 17–20.
10. *Krushenko G.G.* Rol' chastits nanoporoshkov pri formirovaniy struktury alyuminievykh splavov [The role of the nanopowder particles in the formation of the structure of aluminum alloys]. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2011. No. 1. P. 20–24.
11. *Krushenko G.G.* Sredstva i tekhnologii uvelicheniya soderzhaniya nanoporoshkov v alyuminievykh modifikatsionnykh prutkakh [Tools and technology to increase the content of aluminum nanopowders in modifying the rods]. *Nanotekhnika*. 2011. No. 3. P. 55–61.
12. *Krushenko G.G.* Modifikatsionnoe doevtekticheskogo alyuminievo-kremnievogo splava nanoporoshkom nitrida titana pri lit'e slozhnonagruzhenykh detalei transportnogo sredstva [Modification of hypoeutectic aluminum-silicon alloy nanopowder titanium nitride during casting of heavily loaded parts of the vehicle]. *Tekhnologiya metallov*. 2008. No. 11. P. 5–7.
13. *Titova Yu.V., Amosov A.P., Ermoshkin A.A., Markov Yu.M., Khusainova T.N., Popova A.V.* Poluchenie nanoporoshka karbida kremniya i kompozitsii na ego osnove po azidnoi tekhnologii SVS [Obtaining nanopowder of silicon carbide and compositions on its basis by the azide SHS]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2013. No. 3. P. 43–48.
14. *Amosov A.P., Titova Yu.V., Maidan D.A., Ermoshkin A.A., Timoshkin I.Yu.* O primeneniy nanoporoshkovoi produktsii azidnoi tekhnologii SVS dlya armirovaniya i modifikatsionniy alyuminievykh splavov [On the application of nanopowder production azide SHS for the reinforcement and modification of aluminum alloys]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2015. No. 1. P. 68–74. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1-68-74.
15. *Mal'tsev M.V.* Metallografiya promyshlennykh tsvetnykh metallov i splavov [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1970.
16. *Mikheev R.S., Chernyshova T.A.* Diskretno armirovannyye kompozitsionnyye materialy sistemy Al–TiC (obzor) [Discretely reinforced composite materials of Al–TiC (review)]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroeni*. 2008. No. 11. P. 44–53.
17. *Gopienko V.G., Smagorinskii M.E., Grigor'ev A.A., Bellavin A.D.* Spechennyye materialy iz alyuminievykh poroshkov [Sintered materials of aluminum powders]. Moscow: Metallurgiya, 1993.
18. *Antsiferov V.N., Perelman V.E.* Mekhanika protsessov pressovaniya poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov [The mechanics of the processes of powder compaction and composite materials]. Moscow: Graal, 2001.