

# Предварительная подготовка и методы введения в объем медьсодержащих сплавов фуллеренов и их производных

УДК 669.05; 669.017



**Д. Г. Летенко**,  
доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии<sup>1</sup>,  
канд. физ.-мат. наук,  
эл. почта: Dletenko@mail.ru



**А. С. Иванов**,  
доцент кафедры общей и технической физики<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук,  
эл. почта: ivaleks58@gmail.com



**В. В. Фицак**,  
доцент кафедры общей и технической физики<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (ГАСУ), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

**Памяти профессора, докт. физ.-мат. наук  
Александра Борисовича Федорцова посвящается**

## Введение

В настоящее время область применения наномодификаторов [1, 2] и нанотехнологий [3–5] как в металлургии, так и в других сферах постоянно расширяется. С помощью наночастиц создают нанопленки [6–8], наноллисты [9, 10], наномембраны [11], наномодифицированную проволоку [12], наноразмерные покрытия [13–15] (в том числе экологичные покрытия для пищевой промышленности [16]), улучшают барьерные свойства органических покрытий [17]), совершенствуют свойства поверхностных слоев изделий из цветных металлов [18–20]. Методы нанотехнологии позволяют разрабатывать наномодифицированные полимерные [21] и керамические [22, 23] материалы с уникальными свойствами, самовосстанавливающиеся наноматериалы [24], улучшать электропроводность материалов [25], создавать новые экологически чистые конструкционные материалы [26]. При помощи нанотехнологий осуществляют маркировку изделий [27]. Продолжаются работы по синтезу лигатур для введения

В настоящее время одним из важнейших направлений современной металлургии является разработка и производство высокопрочных конструкционных материалов, в частности сплавов металлов. Добиться высоких прочностных показателей можно путем введения в сплав наномодификаторов — нанодисперсных фуллероидных материалов (НФМ), позволяющих изменять структуру сплава вплоть до мелкодисперсного состояния. Поскольку поведение наномодификаторов в жидких средах имеет ряд особенностей, такой процесс потребовал разработки специального технологического цикла, обеспечивающего эффективное совмещение наномодификаторов со сплавом, когда необходимо не только правильно ввести НФМ в жидкий сплав, но и правильно его подготовить. Чтобы добиться равномерного распределения модификаторов по объему заготовки из бронзы БрНХК и получить их заданную концентрацию, потребовалось решить двоякую задачу:

- во-первых, обеспечить быстрое погружение, плавление и растворение лигатуры с наномодификатором внутри жидкого сплава до начала процесса кристаллизации (одновременно исключив контакт НФМ с атмосферным кислородом); для этого были изготовлены образцы в форме таблеток из лигатур на основе медного порошка ПМС-1, удельный вес которых превышал удельный вес аналогичных изделий из сплава, что обеспечивало растворение лигатуры и сплавление с наномодификатором под слоем сплава;
- во-вторых, разрушить агломераты, формируемые группами фуллероидных частиц в жидких средах при взаимодействии друг с другом из-за высокой когезии.

В этих целях была разработана технология глубокой диспергации с использованием механоактивации и ультразвукового воздействия и одновременным поэтапным контролем качества. Показано, что наномодифицирование способствует изменению микроструктуры сплава, что приводит к улучшению его физико-механических свойств.

**Ключевые слова:** цветная металлургия, медь, сплав, модифицирование, фуллерены, наноуглерод, структура, свойства, отливка.

**DOI:** 10.17580/tsm.2023.08.08

наномодификаторов [28, 29] и исследованию термического поведения различных наномодификаторов [30, 31]. Современное состояние нанотехнологии и перспективы ее развития представлены в работах [32–34].

Настоящее исследование направлено на создание нового материала для троллеев (тоководов) электро-транспорта. Материал для этих устройств должен обладать одновременно высокой электропроводностью и хорошими триботехническими и прочностными характеристиками. Традиционно используемая для этих целей медь при высокой электропроводности демонстрирует низкую устойчивость к истиранию и задирам. Сплавы БрНБТ, БрХЦр, БрХ1, МКБ, БрКН и др., применяемые

для изготовления электродов сварки сопротивлением и других электротехнических изделий, обладают недостаточной электропроводностью.

Повышение электропроводности и улучшение физико-механических характеристик сплава можно достичь путем введения нанодисперсного фуллероидного материала (НФМ).

Первоначально полученные материалы характеризовались нестабильностью параметров [35], что объяснялось особенностями поведения НФМ в жидких средах. Дисперсионное взаимодействие наночастиц очень велико. Это приводит к сильнейшей когезии НФМ в суспензиях, вследствие чего возникают агломераты, объединяющие группы наночастиц, и для их разрушения требуется длительное и интенсивное внешнее воздействие при помощи ультразвука. Для использования НФМ в качестве модификатора авторами разработана технология глубокой диспергации с использованием механоактивации и ультразвукового воздействия. Для проведения механоактивации использовали роторный дезагрегатор [36, 37].

Применение способа наномодифицирования расплавленных сред, описанного в работе [38], не позволяло обеспечить заданную равномерную концентрацию модификатора в объеме сплава. Для корректного совмещения наномодификатора с жидким сплавом необходимо было изготовить образцы в форме таблетки из медной лигатуры (далее — ЛТ) с высоким удельным весом, обеспечивающие плавление и растворение лигатуры с наномодификатором внутри сплава и увеличить время контакта полученного образца с объемом жидкого сплава до начала его кристаллизации.

### Используемые материалы и оборудование

Модифицированию подвергали бронзу марки БрНХК (ГОСТ 28873–90 [39], ТУ 48-21-672–79 [40]) состава: 2,5 % Ni; 0,7 % Cr; 0,6 % Si (плотность в жидком состоянии 7,6 г/см<sup>3</sup>). Для изготовления ЛТ использовали медный порошок ПМС-1 (ГОСТ 4960–75 [41]). После прессования ЛТ обрабатывали в атмосфере водорода в электропечи типа ВП-25 при температуре 900–1000 °С (время обработки 2 ч). В качестве модификатора применяли НФМ состава: 60 % углерод (С), 40 % окись кремния (SiO<sub>2</sub>). Результаты дисперсионного анализа материала, полученные с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и метода динамического рассеяния света (ДСР), представлены на **рис. 1** и **2** соответственно. Характеристики материала: средний размер полиэдральных частиц углерода (см. рис. 1) 30 нм, истинная плотность 2,1 г/см<sup>3</sup>, насыпная плотность <0,25 г/см<sup>3</sup>.

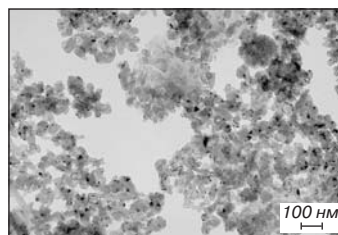
Фуллероидные материалы весьма чувствительны к кислороду при высоких температурах. Состояние их влажности перед использованием контролировали с помощью анализатора влажности AND MX-50.

### Методика проведения эксперимента

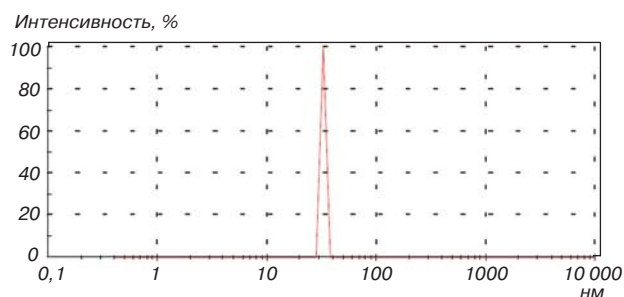
Как было отмечено, при недостаточном удельном весе ЛТ окажется на поверхности зеркала сплава, и кристаллизация начнется раньше, чем произойдет растворение наномодификатора. Увеличение удельного веса ЛТ позволит модификатору быстро проникнуть под слой сплава, одновременно исключив его контакт с атмосферным кислородом. При этом плавка в индукционной печи обеспечивает равномерность концентрации введенного вещества по всему объему жидкого сплава при увеличении времени плавки.

Предложенная технология получения ЛТ была реализована в такой последовательности:

- предварительная подготовка НФМ по описанной ранее методике [38];
- диспергация НФМ с помощью ультразвуковых установок;



**Рис. 1.** Полидисперсные многослойные наночастицы углерода (получено с помощью ПЭМ, JEM1011 JEOL, Япония)



**Рис. 2.** Распределение частиц по размерам в зависимости от интенсивности ДСР



Анализатор влажности AND MX-50



Таблетки лигатуры наномодификатора

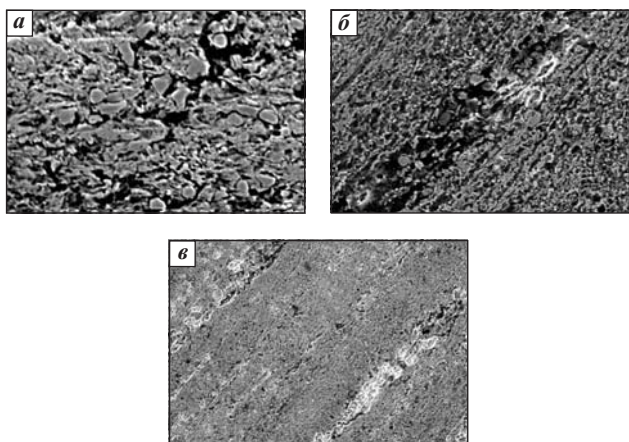


Рис. 3. Сравнительные электронные фотографии поверхности образцов после травления: а — контрольный образец; б — введение НФМ в струю металла; в — введение НФМ под зеркало металла (получено методом СЭМ)

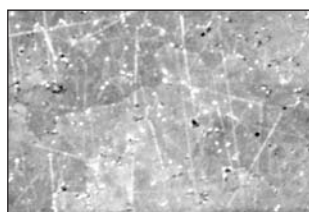


Рис. 4. Поверхность наномодифицированного образца,  $\times 10000$  (получено методом СЭМ)

- совмещение НФМ с металлическим порошком, выбранным в качестве лигатурной основы;
  - отгон дисперсионной среды вакуумным испарителем;
  - создание в пресс-форме инертной атмосферы;
  - предварительное прессование ЛТ;
  - спекание ЛТ в атмосфере водорода;
  - прессование ЛТ до максимальной плотности;
  - контроль плотности (взвешивание).
- Плотность ЛТ достигала  $8 \text{ г/см}^3$ .

Для проведения экспериментов по влиянию наномодифицирования на микроструктуру и физико-механические свойства сплава изготовили ЛТ из расчета плавки от 1 до 30 кг. Исследовали влияние качественного состава и количества НМФ в пересчете на массу готового сплава ( $10^{-2}$ – $10^{-7}$  % (мас.)), способа совмещения с матрицей (жидкофазное, смешение), степени опрессовки в зависимости от качественного, количественного состава и способа смешения.

Введение ЛТ в расплав производили в тигле индукционной печи. Готовый сплав заданного химического состава массой 30 кг делили на 3 равные части по 10 кг: 1-ю часть контрольного состава (без модифицирования) заливали в изложницу; 2-ю часть переливали в тигель, ЛТ с НФМ, приготовленную по технологии [38], вводили в струю расплавленного металла, далее металл из тигля переводили в изложницу; в 3-ю часть сплава вводили ЛТ с удельной плотностью более  $8 \text{ г/см}^3$ , после чего процесс плавки продолжался еще 5 мин.

Из полученных отливок по технологии в соответствии с ГОСТ 7565 [42] изготавливали образцы для испытаний и металлографического анализа. Образцы выполняли в виде бруска Менаже с V-образным надрезом. Для проведения анализа образцов использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) «Филипс-60» XL-30ТМП.

**Результаты исследований**

Результаты сравнительных физико-механических испытаний исходного сплава БрНХК и наномодифицированного сплава БрНХК приведены в **табл. 1**. Металлографический анализ (**рис. 3**) позволил сравнить изменение поверхности шлифа после травления у различных образцов. Анализ выполняли методом СЭМ («Филипс-60» XL-30ТМП).

Таблица 1

**Результаты сравнительных испытаний исходного и наномодифицированного сплавов**

Марка композиции на основе меди	Температура испытаний, °С	Предел прочности, МПа	Поперечное сжатие, %	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Твердость, НВ	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·см
БрНХК (стандартная технология)	- 196	720	13,4	5,6	11	229	3,8
	20	640	18,6	5,8			
	700	170	26,9	3,4			
БрНХК (предложенная технология)	- 196	755	22,3	9,0	16,5	230	3,3
	20	711	20,3	7,6			
	700	184	43,3	8,6			

После протравки поверхности образцов становится очевидным влияние модифицирования на изменение характера кристаллизации. В случае модифицирования сплава по предложенной технологии формируется более мелкая кристаллическая структура. Установлено (рис. 4), что при кристаллизации НФМ располагаются по границам кристаллитов. Возможно, этим и объясняется существенное повышение электропроводности материала (см. табл. 1).

### Заключение

Проведена разработка опытно-промышленной технологии получения металлического сплава на основе меди с объемной наномодификацией фуллеренами и их производными, обеспечивающей улучшение его потребительских свойств. На примере бронзы

показано, что введение фуллероидных модификаторов в металлические матрицы изменяет физико-механические и химические свойства материала. Оптимизирован способ введения НФМ в расплав металла. Наномодифицирование способствует изменению микроструктуры сплава, что приводит к улучшению его физико-механических свойств при экстремальных режимах эксплуатации (повышенных и криогенных температурах, см. табл. 1).

**Статья рекомендована к печати оргкомитетом международного симпозиума «Нанозифика и Наноматериалы».**

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

*Tsvetnye Metally*. 2023. No. 8. pp. 46–50  
DOI: 10.17580/tsm.2023.08.08

#### PREPARATION OF FULLERENES AND THEIR DERIVATIVES AND THEIR INTRODUCTION INTO COPPER ALLOYS

##### Information about authors

D. G. Letenko, Associate Professor at the Department of Construction Materials Engineering and Metrology<sup>1</sup>, Candidate of Physics & Mathematics Sciences, e-mail: Dletenko@mail.ru

A. S. Ivanov, Associate Professor at the Department of General and Applied Physics<sup>2</sup>, Candidate of Technical Sciences, e-mail: ivaleks58@gmail.com

V. V. Fitsak, Associate Professor at the Department of General and Applied Physics<sup>2</sup>, Candidate of Technical Sciences

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint Petersburg, Russia.

<sup>2</sup>Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

##### Abstract

One of the most critical areas in today's metallurgy includes the development and production of high-strength structural materials, in particular metal alloys. High strength can be achieved in alloys through the introduction of nanoinoculants – i.e. nanodispersed fullerenes, which are capable of modifying the structure to a fine-dispersed state. Since nanoinoculants tend to demonstrate a particular type of behavior in liquid environments, a specific production cycle had to be designed that would ensure effective blending because not only nanodispersed fullerenes should be properly introduced into liquid alloy, but they should also be properly prepared. In order to achieve an even distribution of inoculants throughout a specimen made of bronze BrNKhK and reach a given concentration, the authors had to tackle two problems:

- ensure quick submersion, melting and dissolution of the master alloy with a nanoinoculant in the liquid alloy before the solidification has started (preventing at the same time the contact of nanodispersed fullerene with atmospheric air); for this, tablet-shaped specimens were made out of copper powder PMS-1-based master alloys, the specific weight of which exceeded the one of similar items made of the actual alloy, and thus the master alloy would dissolve and fuse with the nanoinoculant under the alloy layer;
- break the agglomerates formed by groups of fulleroid particles in liquid environments as the result of co-interaction due to their high cohesion.

For this purpose, a process of deep dispersion was developed that involves mechanical activation and ultrasonic impact with simultaneous quality control at each stage. It is shown that nanoinoculation changes the microstructure of the alloy resulting in enhanced physico-mechanical properties.

**Key words:** non-ferrous metallurgy, copper, alloy, inoculation, fullerene, nanocarbon, structure, properties, casting.

##### References

1. Malaki M., Xu W., Kasar A. R. et al. Advanced metal matrix nanocomposites. *Metals*. 2019. Vol. 9, Iss. 3. p. 330.
2. Budelovskiy D. I., Petrovich S. Yu., Lipin V. A. Emergence and growth of nanodispersed intermetallic strengthening inclusions in rapidly cooled Al – Mg – Zr – X alloys: Features. *Zapiski Gornogo instituta*. 2018. Vol. 230. pp. 139–145.
3. Wang W., Yi D., Hua W., Wang B. High damping capacity of Al-40Zn alloys with fine grain and eutectoid structures via Yb alloying. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 870. p. 159485.

4. Kurganova Yu. A., Shcherbakov S. P. Effect of a discrete additive of aluminium oxide on the structure and properties of aluminium alloy. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 228. pp. 717–721.

5. Syrkov A. G., Yachmenova L. A. Metallurgical products obtained by solid-state hydride synthesis. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 651–662.

6. Goncharova M. V., Mikhailova M. S. Two dynasties of mining engineers: the Beloglazaovs and the Thiemes – two branches of the same family – for a century and a half serving the Mining University. *Tsvetnye Metally*. 2023. No. 7. P. 90–96.

7. Tupik V. A., Margolin V. I., Kostrin D. K., Farmakovskiy B. V. Deposition of metal nanofilms on cylinder-shaped items. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 4. pp. 46–50.

8. Abe H., Kimura Y., Ma T., Tadaki D. et al. Response characteristics of a highly sensitive gas sensor using a titanium oxide nanotube film decorated with platinum nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. Vol. 321. p. 128525.

9. Voznyakovskii A., Vozniakovskii A., Kidalov S. New way of synthesis of few-layer graphene nanosheets by the self propagating high-temperature synthesis method from biopolymers. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. p. 657.

10. Zhou J., Guo M., Wang L., Ding Y. et al. 1T-MoS<sub>2</sub> nanosheets confined among TiO<sub>2</sub> nanotube arrays for high performance supercapacitor. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 366. pp. 163–171.

11. Fang W., Yu L. Preparation, characterization and photocatalytic performance of heterostructured CuO – ZnO-loaded composite nanofiber membranes. *Bellstein Journal of Nanotechnology*. 2020. Vol. 11, No. 1. pp. 631–650.

12. Lashkov A. V., Fedorov F. S., Vasilkov M. Y., Kochetkov A. V. et al. The Ti wire functionalized with inherent TiO<sub>2</sub> nanotubes by anodization as one-electrode gas sensor: A proof-of-concept study. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. Vol. 306. p. 127615.

13. Syrkov A. G., Kushchnko A. N., Silivanov M. O., Taraban V. V. Nanostructured regulation of the surface properties and hydrophobicity of nickel and iron by solid-state reduction and modifying methods. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 5. P. 54–59.

14. Bazhin V. Y., Aryshenskii E., Hirsch J., Kawalla R. et al. Impact of Zener-Hollomon parameter on substructure and texture evolution during thermomechanical treatment of iron-containing wrought aluminium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29, Iss. 5. P. 893-906. DOI: 10.1016/S1003-6326(19)64999-X.

15. Pshchelko N. S. Use of hydrophobic nanocoatings to obtain silicon dioxide electrets. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 230. pp. 146–152.

16. Ma J., An W., Xu Q., Fan Q., Wang Y. Antibacterial casein-based ZnO nanocomposite coatings with improved water resistance crafted via double in situ route. *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 134. pp. 40–47.

17. Nguyen-Tri P., Nguyen T. A., Carriere P., Ngo Xuan C. Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications. *International Journal of Corrosion*. 2018. Vol. 2018. pp. 1–19. 4749501.

18. Pryakhin E. I., Troshina E. Yu. Degradation induced by thermal and chemical on matrix codes installed on brass and aluminium alloy parts by laser. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. P. 87–91.

19. Krasikov A. V., Markov M. A., Merkulova M. V., Gerashchenkov D. A. et al. Laser hardening of nanostructured Ni – W coatings. *Nanophysics & Nanomaterials: Proceedings of the International Conference*. 24–25 November 2021, Saint Petersburg, 2021. pp. 151–155.

20. Prokopchuk N. R., Globa A. I., Laptik I. O., Syrkov A. G. The properties of metal coatings enhanced with diamond nanoparticles. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 6. pp. 55–58.

21. Bailey E. J., Winey K. I. Dynamics of polymer segments, polymer chains, and nanoparticles in polymer nanocomposite melts: A review. *Progress in Polymer Science*. 2020. Vol. 105. p. 101242.
22. Korableva E. A., Kharitonov D. V., Anashkina A. A., Lemeshev D. O. Creation of heat-resistant nanostructure ceramics in  $ZrO_2 - MgO$  system. *Tsvetnye Metally*. 2019. No. 10. pp. 61–66.
23. Zhigachev A. O., Golovin Yu. A., Umrikhin A. V., Korenkov V. V. et al. Hi-tech nanostructured zirconium dioxide ceramics. *World of Materials and Technologies*. 2<sup>nd</sup> revised edition. Moscow: Tekhnosfera, 2020. pp. 340–370.
24. Gerasimova A. S., Borisova L. G. Development of self-healing nanomaterials as one of the areas in modern materials engineering. *Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering (IPDME 2017): Proceedings of the International Science & Technology Conference*. 23–24 March 2017. St Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gorniy universitet. 2017. pp. 24.
25. Ryabko A. A., Mazing D. S., Bobkov A. A., Maksimov A. I. et al. The effect of interface doping of a zinc oxide nanorods system. *Fizika tverdogo tela*. 2022. Vol. 64. pp. 1681–1689.
26. Pruna A. Nanotechnology in eco-efficient construction. Second edition. *Materials, Processes and Applications*. 2018. pp. 337–359.
27. Petkova A. P., Ganzulenko O. Y. Laser marking of non-ferrous metal and alloy products using ultradense barcodes: process features. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. P. 92–97.
28. Demidov S. S., Bazhin V. Yu., Savchenkov S. A. Master alloys synthesized by aluminothermic reduction of ytterbium oxide with the production of nanosized intermetallics. *Nanophysics & Nanomaterials: Proceedings of the International Conference*. 23–24 November 2022, Saint Petersburg. pp. 100–104.
29. Brichkin V. N., Vorobiev A. G., Bazhin V. Y. Mining Institute's metallurgists: a tradition serving the country, science and production industry. *Tsvetnye Metally*. 2020. No 10. P. 4–13.
30. Barbin N. M., Yakupova L. V., Terentiev D. I., Alekseev S. G. Thermal behavior of fullerene S56. *Nanophysics & Nanomaterials: Proceedings of the International Conference*. 25–26 November 2020, Saint Petersburg. 2020. pp. 42–47.
31. Barbin N. M., Yakupova L. V., Terentiev D. I., Kuanyshev V. T. Thermal behavior of C32 carbon nanoparticles in a nitrogen atmosphere. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1688. 01.2002.
32. Yurak V. V., Dushin A. V., Mochalova L. A. Vs sustainable development: scenarios for the future. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. pp. 242–247.
33. Cheremisina E., Cheremisina O., Ponomareva M., Bolotov V., Fedorov A. Kinetic features of the hydrogen sulfide sorption on the ferro-manganese material. *Metals*. 2021. Vol. 11. P. 90. DOI: 10.3390/met11010090.
34. Litvinova T. E., Kashurin R., Lutskiy D. Complex formation of rare-earth elements in carbonate-alkaline media. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3140. DOI: 10.3390/ma16083140.
35. Letenko D. G., Nikitin V. A., Charykov N. A., Semenov K. N. et al. Production of carbon nanostructures from chemical waste. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov*. 2010. No. 1. pp. 108–118.
36. Letenko D. G., Nikitin V. A., Menshikova A. Yu., Pukhareno Yu. V. et al. The physico-chemical properties of water dispersions of a mixed fulleroid-type nanocarbon material. Part I. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov*. 2010. No. 2. pp. 131–138.
37. Letenko D. G., Ivanov A. S., Matuzenko M. Yu., Nikitin V. A. et al. The physico-chemical properties of water dispersions of a mixed fulleroid-type nanocarbon material. Part II. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov*. 2010. No. 3. pp. 117–121.
38. Bezruchko G. S., Razorenov S. V., Popov M. Yu. Effect of the S60 fullerene additive on the strength of nanocrystalline copper and aluminium under shock-wave loading. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2014. No. 3. pp. 69–74.
39. GOST 28873–90. Alloys on the basis of heavy non-ferrous metals treated under pressure. Unified grades. Introduced: 01.01.1992.
40. TU 48-21-672–79. Strips made of alloy BRNKh 2.5 – 0.7 – 0.6. Introduced: 10.03.1980.
41. GOST 4960–75. Electrolytic copper powder. Specifications. Introduced: 01.01.1977.
42. GOST 7565–81. Iron, steel and alloys. Sampling for determination of chemical composition. Introduced: 01.01.1982.

## Микроструктурные особенности лигатур Al – Yb, получаемых при алюминотермическом восстановлении фторида иттербия

УДК 541.412



**В. Ю. Бажин**,  
заведующий кафедрой металлургии<sup>1</sup>,  
докт. техн. наук, профессор,  
эл. почта: bazhin\_vyu@pers.spmi.ru



**Н. А. Гордевнин**,  
магистрант кафедры металлургии<sup>1</sup>,  
эл. почта: s222647@stud.spmi.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Получение алюминиевых лигатур с редкоземельными металлами широко изучается многими учеными в области цветной металлургии. Важной задачей является поиск альтернативных скандию редкоземельных элементов, способных полностью или частично его заменить, при этом сохранить физико-химические характеристики алюминиевых сплавов, определяющих их использование в передовых отраслях промышленности. Двойная лигатура алюминий – иттербий является перспективной легирующей и модифицирующей добавкой к алюминиевым сплавам, что обусловлено доказанной эффективностью влияния иттербия на структуру и свойства алюминиевых сплавов за счет образования интерметаллических частиц  $Al_3Yb$ . Изучены параметры микроструктуры лигатур Al – Yb с разным содержанием иттербия, полученных методом металлотермического восстановления солевых расплавов. На основании термодинамического анализа, с учетом образования алюминидов  $Al_3Yb$  в интервале температур 750–760 °С, при времени выдержки 15–20 мин методом алюминотермического восстановления во фторидно-хлоридном расплаве  $YbF_3 - NaF - KCl$  синтезированы двойные лигатуры Al – Yb, содержащие 3 и 6 % (мас.) иттербия. Методом электронно-сканирующей микроскопии установлено, что такие лигатуры состоят из равноосных дендритов алюминия  $\alpha-Al$  и эвтектики  $Al + Al_3Yb$ , с включениями алюминидов  $Al_3Yb$ , расположенных на межфазных границах и в объемах эвтектики. Установлено, что форма и дисперсность структурных составляющих лигатуры Al – Yb зависит от содержания иттербия.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, лигатура, восстановление, микроструктура, наночастица,  $Al_3Yb$ .

**DOI:** 10.17580/tsm.2023.08.09