

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 621.794.61
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-5-425-432>

Поступило в редакцию 04.03.2025
Received 04.03.2025

А. И. Комаров¹, академик С. А. Жданок², Д. В. Орда¹, А. С. Чернявская¹

¹*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*ООО «Передовые исследования и технологии», Минск, Республика Беларусь*

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ А7Е
МОДИФИЦИРОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ С МЕДЬЮ**

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры и основных механических характеристик электротехнического алюминиевого сплава А7Е, используемого в производстве электрических проводов, после модифицирования углеродными нанотрубками (УНТ) и медью. Показано, что модифицирование сплава УНТ и медью в различном соотношении оказывает воздействие на физико-механические характеристики полученных отливок: комплексное введение УНТ с медью обеспечивает увеличение прочности на 25 МПа с незначительным снижением пластичности (на 25–35 %). Полученные результаты позволяют заключить, что введение УНТ в расплав электротехнического алюминия А7Е является перспективным способом повышения его механических характеристик.

Ключевые слова: электротехнический алюминий, углеродные нанотрубки, структура, модифицирование, механические свойства

Для цитирования. Повышение прочности электротехнического алюминия А7Е модифицированием углеродными нанотрубками с медью / А. И. Комаров, С. А. Жданок, Д. В. Орда, А. С. Чернявская // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 5. – С. 425–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-5-425-432>

Alexandr I. Komarov¹, Academician Sergey A. Zhdanok², Dmitry V. Orda¹, Alexandra S. Chernyavskaya¹

¹*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Advanced Research and Technologies LLC, Minsk, Republic of Belarus*

**INCREASING THE STRENGTH OF ELECTRICAL ALUMINUM 1370 BY MODIFYING CARBON
NANOTUBES WITH COPPER**

Abstract. This paper presents the results of a study of the structure and main mechanical characteristics of the electrical aluminum alloy 1370 used in the production of electrical wires after modification with carbon nanotubes (CNTs) and copper. It is shown that modification of the alloy with CNTs and copper in different ratios affects the physical and mechanical characteristics of the resulting castings, so the complex introduction of CNTs with copper provides an increase in strength by 25 MPa with a slight decrease in ductility (by 25–35 %). The results obtained allow us to conclude that the introduction of CNTs into the melt of electrical aluminum 1370 is a promising way to improve its mechanical characteristics.

Keywords: electrical aluminum, carbon nanotubes, structure, modification, mechanical properties

For citation. Komarov A. I., Zhdanok S. A., Orda D. V., Chernyavskaya A. S. Increasing the strength of electrical aluminum 1370 by modifying carbon nanotubes with copper. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 5, pp. 425–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-5-425-432>

Введение. Повышение прочности алюминиевых проводов является одной из главных задач в обеспечении надежности воздушных линий электропередач (ЛЭП)¹ [1]. Перспективным направлением обеспечения требуемого уровня механических характеристик алюминия, используемого

¹ ЧТУП «БИМТЭК». Алюминиевый композитный усиленный провод (АССР). Новое поколение линий электропередачи. – Минск, 2024–2025. – URL: <https://beamtech.by/images/articles/1.pdf> (дата обращения: 08.01.2025).

для изготовления проводов ЛЭП, является модифицирование сплавов наноматериалами [2–4]. Особое положение занимают углеродные наноструктуры, такие как одностенные и многостенные нанотрубки (МУНТ) [4], онионы, наноалмазы [2], фуллерены C₆₀ и графены [3]. Эти наночастицы обладают высокими значениями тепло- и электропроводности, сверхупругостью и имеют прочность, близкую к теоретической, что открывает возможность получения композиционных материалов, в том числе алюмоматричных, с высоким уровнем физико-механических свойств. В [5] показано, что композиционный материал на основе алюминия с добавкой МУНТ, полученный методом прокатки с последующим спеканием, характеризуется приростом предела прочности по сравнению с чистым алюминием на 50–60 %. Повышение механических характеристик в результате модифицирования углеродными нанотрубками также было достигнуто при их добавке в расплав литейного алюминий-кремниевого сплава АК12М2МгН [6]. В этом случае при введении в расплав МУНТ производства ООО «Перспективные исследования и технологии» в количестве 0,4 мас. % предел прочности повысился в 1,5 раза при одновременном повышении пластичности в 2 раза. Учитывая полученный эффект, интересным с научной и практической точек зрения представляется использовать указанный углеродный наноматериал для модифицирования электротехнического алюминия с целью повышения его прочности.

Материалы и методы исследований. В качестве исходного материала был выбран электротехнический алюминиевый сплав А7Е (ГОСТ 11069-2001), модифицирование которого осуществлялось углеродным наноструктурированным материалом МУНТ (рис. 1) производства компании «Передовые исследования и технологии» (ТУ BY 691460594.002-2016).

Смачиваемость углеродных частиц расплавом алюминия низкая, для повышения эффективности модифицирования МУНТ вводились совместно с порошком меди марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-2017) согласно патенту¹. Модифицирующий состав из смеси углеродных нанотрубок и микропорошка меди подготавливали в пропорциях, указанных в табл. 1. Подготовленную смесь подвергали ультразвуковой обработке в этиловом спирте в течение 10–15 мин с последующей сушкой при 85–90 °С. Затем с использованием алюминиевой фольги готовили многослойную капсулу с навеской модифицирующей смеси.

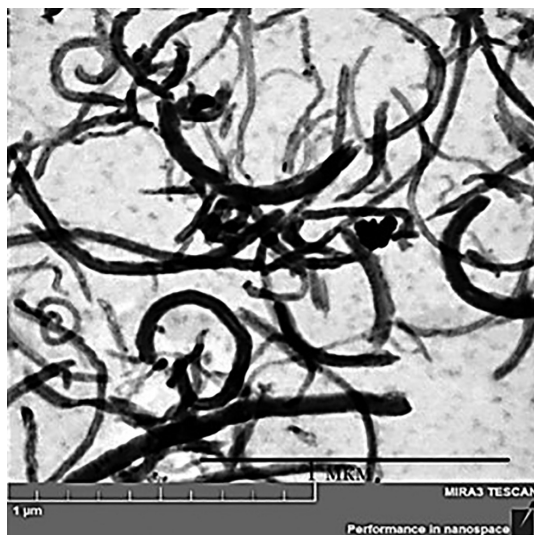


Рис. 1. Структура углеродного наноструктурированного материала МУНТ производства компании «Передовые исследования и технологии» (ТУ BY 691460594.002-2016)

Fig. 1. Structure of carbon nanostructured material MWCNT, produced by Advanced Research and Technology (TU BY 691460594.002-2016).

¹ Патент BY 22644, МПК С 22С 21/04 С 22С 1/10 (2006.01). Способ модифицирования алюминия или алюминий-кремниевых сплавов: № а 20170407: заявлено 30.10.2017: опубл. 30.08.2019 / Комаров А. И., Комарова В. И., Орда Д. В., Искандарова Д. О.; заявители: Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. – 4 с.

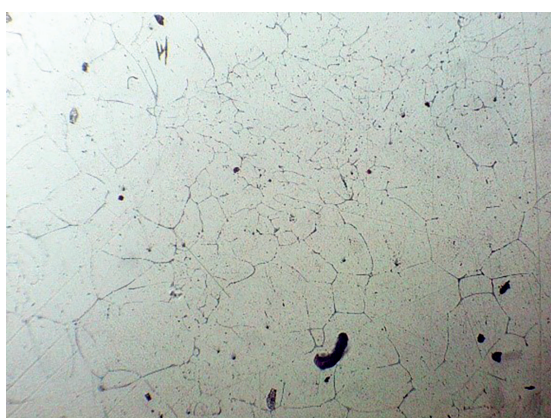
Т а б л и ц а 1. Состав образцов отливок

T a b l e 1. Composition of casting samples

Обозначение образца Sample designation	Медь, мас. % Copper, wt. %	УНТ, мас. % CNT, wt. %
I	—	—
II	0,25	—
VI	—	0,05
VII	0,25	0,05
X	0,1	—
VIII	—	0,02
IX	0,1	0,02
III	0,5	—
XII	—	0,1
XIII	0,5	0,1
XI	1,0	—
XIV	—	0,2
XV	1,0	0,2
XVI	—	—

Перед введением в расплав, капсулу подвергали нагреву до 300 °С и выдержке в течение 10 мин. Методом «колокольчика» капсулу вводили в расплав при 760 °С и выдерживали в печи 10 мин для дополнительной гомогенизации расплава. Отливку металла проводили в предварительно нагретый до 400 °С стальной кокиль. После остывания до комнатной температуры отливки отрезали серединную часть для проведения металлографических исследований и рентгеноструктурного анализа. Также отливались образцы для исследования механических характеристик на растяжение, которые проводились на универсальной компьютеризированной гидравлической машине INSTRONSatcs 300LX, в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84. Скорость нагружения составляла 5 мм/мин.

Микроструктура отливок. Микроструктуры образцов отливок сплава А7Е в исходном состоянии и с добавкой УНТ представлены на рис. 2 и 3. Анализ приведенных данных показал, что степень перегрева расплава оказывает заметное воздействие на структуру сплава А7Е. Так, при нагреве расплава до температуры 740 °С и последующей отливке в нагретый до 400 °С металлический кокиль формируется неоднородная структура (рис. 2, *a*), сочетающая зерна различного размера (50–200 мкм). При нагреве расплава до 760 °С, для улучшения процессов смачивания, после литья формируется структура из равномерных вытянутых зерен, характерная для направленной кристаллизации (рис. 2, *b*).

*a**b*Рис. 2. Микроструктура образца I (*a*) и XVI (*b*)Fig. 2. Microstructure of sample I (*a*) and XVI (*b*)

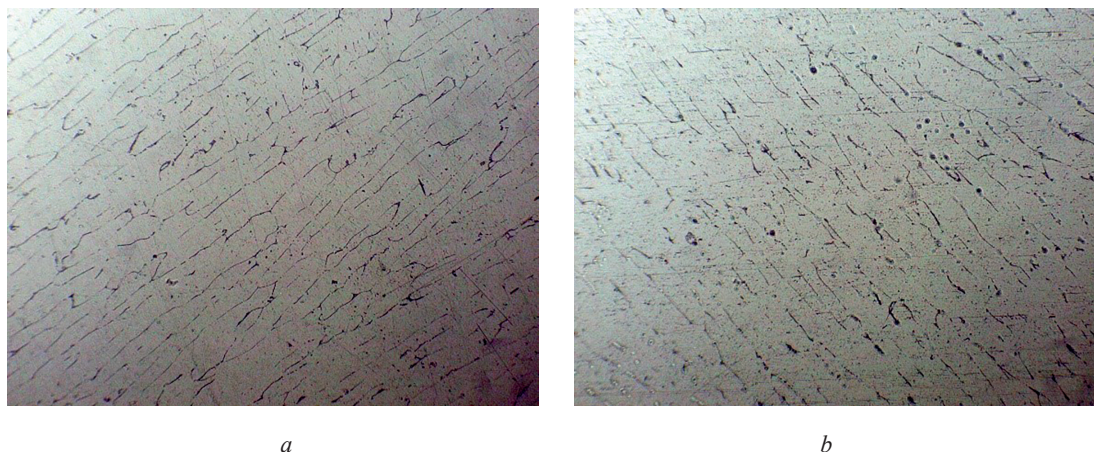


Рис. 3. Микроструктура образцов из сплава А7Е, модифицированных медью (а, образец Х) и совместно УНТ и медью (b, образец VII)

Fig. 3. Microstructure of samples of 1370 alloy modified with copper (a, sample X) and with CNTs and copper together (b, sample VII)

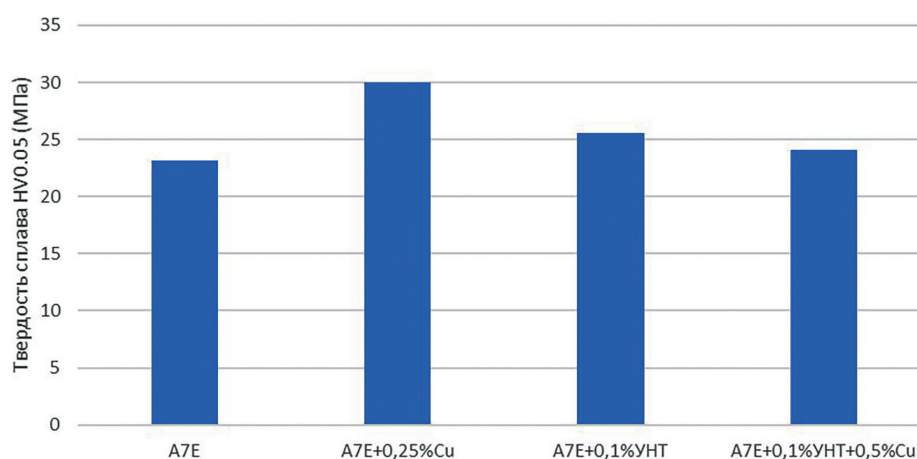


Рис. 4. Диаграмма изменения твердости сплава А7Е после модифицирования 0,5 % Cu и 0,1 % УНТ различных комбинаций

Fig. 4. Diagram of the change in hardness of the 1370 alloy after modification with 0.5 % Cu and 0.1 % CNT of various combinations

Согласно результатам, модифицирование сплава А7Е в различных комбинациях не оказывает заметного влияния на микроструктуру отливок. Можно лишь отметить более выраженные признаки текстуры, которые проявляются в существенной неравноосности зерен (рис. 3).

Механические характеристики. Несмотря на отсутствие заметного различия в микроструктуре, модифицирование сплава углеродными нанотрубками и медью в различном соотношении оказывает воздействие на физико-механические характеристики полученных отливок. Так, измерение микротвердости показало, что добавка меди в количестве 0,25 мас. % (образец III) приводит к повышению микротвердости на 22 % (рис. 4). Меньший рост микротвердости наблюдается при введении УНТ в количестве 0,1 мас. % (на 9 %) и совместном введении УНТ и меди (на 4 %).

Полученные данные согласуются с результатами исследования прочностных свойств, оценка которых проводилась на серии образцов, содержащих одинаковое количество модифицирующих добавок (0,5 % Cu и 0,1 % УНТ) в различных комбинациях.

Средние значения предела прочности исследуемых образцов представлены в табл. 2. Из полученных данных следует, что исходный сплав имеет прочность на уровне 100 МПа, которая

сочетается с высокой пластичностью (до 40 %). Введение меди приводит к увеличению предела прочности на 20 МПа, но при этом происходит заметное снижения пластичности. Однако введение УНТ сопровождается повышением прочности с сохранением пластичности сплава, тогда как комплексное введение УНТ с медью обеспечивает увеличение прочности на 25 МПа (в среднем) с незначительным снижением пластичности (на 25–35 %).

Т а б л и ц а 2. Значения прочностных характеристик образцов из сплава А7Е, модифицированного различными добавками

Table 2. Values of strength characteristics of samples made of 1370 alloy modified with various additives

Метка образца Specimen Mark	Диаметр (мм) Diameter (mm)	Длина (мм) Length (mm)	Напряжение при максимальной нагрузке, среднее (МПа) Stress at maximum load, average (MPa)	Деформация при растяжении, среднее (%) Tensile strain, average (%)
XVI	6,0	26,6	100	40
III	6,0	26,6	120	15
XII	6,0	26,6	115	30
XIII	6,0	26,6	125	25

Результаты химического состава образцов показали, что медь хуже усваивается при введении совместно с УНТ (табл. 3, образцы XVI и XIII), что, вероятно, обусловлено низкой смачиваемостью УНТ алюминиевым расплавом и экстракцией некоторого количества связанной с ними меди. Это указывает на то, что прирост прочности в образце XIII вызван не только введением меди, но и воздействием УНТ. Данное предположение также подтверждается изменением пластичности модифицированных отливок.

Т а б л и ц а 3. Результаты исследования элементного состава образцов, мас. %

Table 3. Results of the study of the elemental composition of samples, weight %

Образец Sample	Al	Si	S	Ti	Fe	Co	Cu	Zn	Ga
I	99,451	0,316	0,009	—	0,213	—	0,001	0,003	0,007
III	99,105	0,335	0,007	0,010	0,211	—	0,322	0,004	0,006
XII	99,433	0,347	0,011	—	0,193	—	0,006	0,003	0,007
XIII	99,317	0,335	0,007	—	0,234	—	0,096	0,004	0,007
XVI	99,277	0,365	0,010	—	0,257	0,080	0,001	0,003	0,007

Повышение механических характеристик сплава в результате модифицирования можно связывать с воздействием УНТ и меди на его субзеренное строение. Методом рентгеноструктурного анализа был определен размер кристаллитов, который приблизительно совпадает с размером областей когерентного рассеяния (ОКР). Полученные результаты показали, что модифицирование УНТ и/или медью оказывает существенное влияние на размер ОКР и при этом зависит от содержания и соотношения УНТ и меди (рис. 5).

Как следует из полученных данных, размер ОКР зависит от концентрации вводимых УНТ и носит экстремальный характер (рис. 5). Так, наименьшее значение ОКР достигается при прямом введении УНТ (без меди) и их концентрации 0,05 мас. %. В этом случае средний размер ОКР составляет 100 нм, что соответствует нанометровому диапазону по принятой градации. Снижение, а также повышение концентрации УНТ приводит к росту величины ОКР.

Совместное введение УНТ с медью не оказывает столь же эффективного влияния на размер ОКР. В этом случае наименьшее значение этого параметра составляет ~400 нм при соотношении УНТ и меди: 0,02 % УНТ + 0,1 % Cu и 0,05 % УНТ + 0,25 % Cu, мас. %. Следует отметить, что добавка меди также снижает размер ОКР. Наибольший эффект достигается при концентрации меди 0,5 мас. %, при этом размер ОКР составляет ~120 нм.

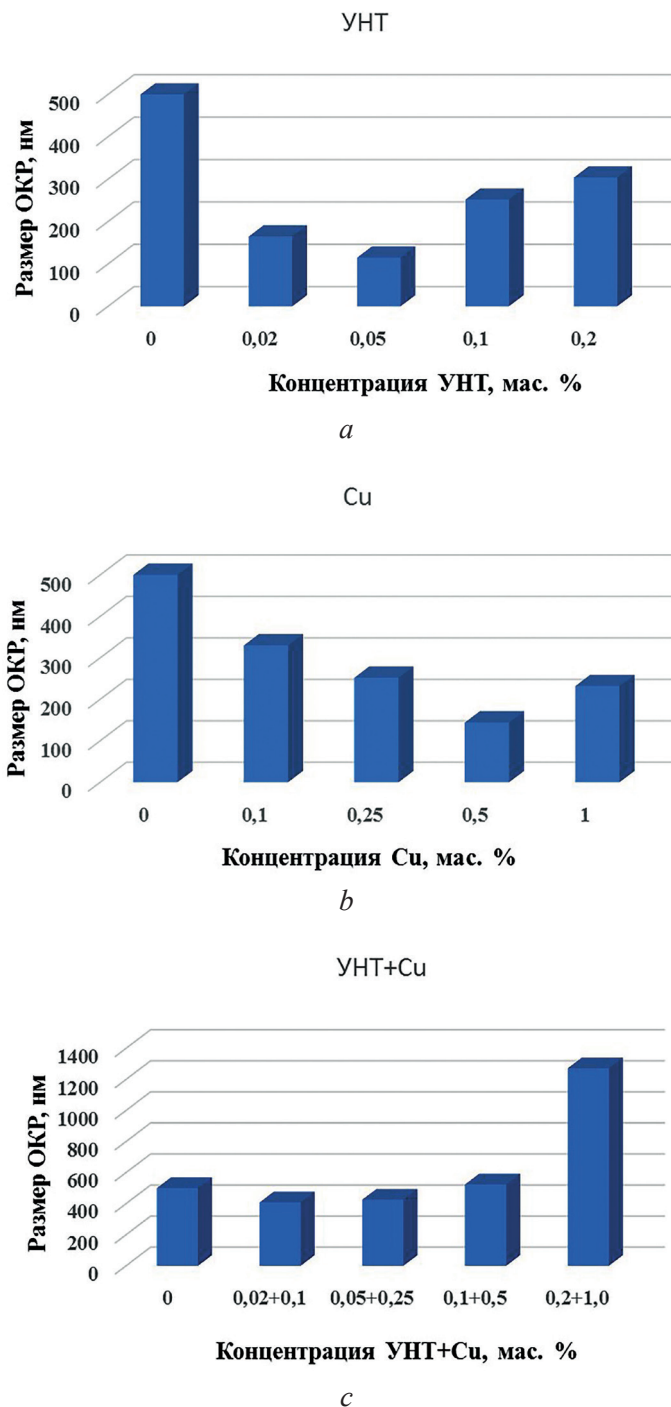


Рис. 5. Изменение размера ОКР при модифицировании сплава А7Е – УНТ и Cu

Fig. 5. Change in the size of the RCS when modifying the 1370 alloy – CNT and Cu

Закключение. Установлено, что модифицирование расплава А7Е углеродными нанотрубками оказывает воздействие на прочностные свойства. Введение меди сопровождается повышением прочности, но вызывает интенсивное снижение пластичности сплава. Комплексное же введение УНТ с Cu приводит к повышению прочности сплава с незначительным снижением пластичности.

Показано, что модифицирование сплава как УНТ, так и медью, либо совместное введение модифицирующей добавки не оказывает заметного влияния на размер зерна. Однако добавка УНТ приводит к снижению размера ОКР, при этом наименьшее значение ОКР достигается при

концентрации УНТ 0,05 мас. %. В этом случае средний размер ОКР составляет 100 нм, что соответствует нанометровому диапазону. Снижение, а также повышение концентрации УНТ приводит к росту величины ОКР. Сделано заключение, что повышение прочностных свойств сплава обусловлено диспергированием субзеренной структуры, обусловленным воздействием МУНТ.

Список используемых источников

1. Харитонов, В. А. Повышение жесткости проводов воздушных линий электропередач / В. А. Харитонов, М. Ю. Витушкин, М. Ю. Усанов // Теория и технология металлургического производства. – 2021. – № 3 (38). – С. 17–23.
2. Транспортные свойства наноструктурных алюмоматричных композиционных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами / И. А. Евдокимов, Д. А. Овсянников, Р. Р. Хайруллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2020. – Т. 63, № 12. – С. 44–49.
3. Ваганов, В. Е. Углеродсодержащие композиты на основе металлов / В. Е. Ваганов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 10 (211). – С. 21–28.
4. Композиционный материал на основе алюминия с добавлением многостенных углеродных нанотрубок: получение, структура, свойства / Н. А. Бунаков, Д. В. Козлов, В. Н. Голованов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 134–146.
5. Алюминиевый композиционный материал с нанодисперсной упрочняющей фазой, сформированный аккумулятивной прокаткой / А. Ю. Огнев, И. С. Лаптев, В. В. Базаркина [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3 (52). – С. 40–42.
6. Влияние комплексного модифицирования углеродными нанотрубками и медью на структуру и свойства сплава АК12М2МгН / А. И. Комаров, В. И. Комарова, Д. В. Орда, Д. О. Искандарова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – Мн., 2017. – Вып. 6. – С. 369–371.

References

1. Kharitonov V. A., Vitushkin M. Yu., Usanov M. Yu. Increasing the rigidity of overhead transmission line wires. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva = Theory and Technology of Metallurgical Production*, 2021, no. 3 (38), pp. 17–23 (in Russian).
2. Evdokimov I. A., Ovsyannikov D. A., Khairullin R. R., Perfilov S. A., Pozdnyakov A. A., Sukhorukov D. V., Lomakin R. L., Pakhomov I. V. Transport properties of nanostructured aluminum-matrix composite materials modified with carbon nanostructures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = ChemChem-Tech*, 2020, vol. 63, no. 12, pp. 44–49 (in Russian).
3. Vaganov V. E. Carbon-containing metal-based composites. *Visnik Pridniprovsk'koï derzhavnoï akademii budivnitstva ta arkhitekturi = Bulletin of the Pridniprovsk State Academy of Construction and Architecture*, 2015, no. 10 (211), pp. 21–28 (in Russian).
4. Bunakov N. A., Kozlov D. V., Golovanov V. N., Klimov E. S., Efimov M. S. An aluminum-based composite material with multi-walled carbon nanotubes: fabrication, structure and properties. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Fiziko-matematicheskie nauki = News of Higher Education Institutions. Volga Region. Physical and Mathematical Sciences*, 2016, no. 2 (38), pp. 134–146 (in Russian).
5. Ognev A. Yu., Laptev I. S., Bazarkina V. V., Bataev I. A., Bataev V. A. Aluminum composite material with nanoscale reinforce phase fabricated by accumulative roll-bonding. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Processing (Technology, Equipment, Tools)*, 2011, no. 3 (52), pp. 40–42 (in Russian).
6. Komarov A. I., Komarova V. I., Orda D. V., Iskandarova D. O. The influence of complex modification with carbon nanotubes and copper on the structure and properties of silumin AK12M2MgN. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sbornik nauchnykh trudov [Current issues in mechanical engineering: a collection of scientific papers]*, Minsk, 2017, vol. 6, pp. 369–371 (in Russian).

Информация об авторах

Комаров Александр Иванович – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: al_kom@tut.by. ORCID: 0000-0001-7261-1140.

Жданок Сергей Александрович – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Передовые исследования и технологии (ул. Совхозная, 1-16, 223058, д. Лесковка, Минский р-н, Республика Беларусь). E-mail: ceo@art-pte.com.

Information about the authors

Komarov Alexandr I. – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: al_kom@tut.by. ORCID: 0000-0001-7261-1140.

Zhdanok Sergey A. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher. Advanced Research and Technology (1-16, Sovkhoznyaya Str., 223058, Leskovka village, Minsk district, Republic of Belarus). E-mail: ceo@art-pte.com.

Орда Дмитрий Владимирович – науч. сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dmitry_orда@mail.ru. ORCID: 0000-0001-5730-9154.

Чернявская Александра Сергеевна – науч. сотрудник. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: romanuk.alexandra1@gmail.com. ORCID: 0009-0006-9412-8364.

Orda Dmitry V. – Researcher. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dmitry_orда@mail.ru. ORCID: 0000-0001-5730-9154.

Chernyavskaya Alexandra S. – Researcher. Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: romanuk.alexandra1@gmail.com. ORCID: 0009-0006-9412-8364.