

**MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT ALUMINIUM WIRE MADE OF Al-0.4 WT.% Zr ALLOY COPPER-PLATED BY ELECTROCHEMICAL METHOD**

*Andrey Evgenievich Medvedev*<sup>1a</sup>, *Christina Eduardovna Kiryanova*<sup>1</sup>,  
*Evgenii Borisovich Medvedev*<sup>1</sup>, *Mikhail Viktorovich Gorbatkov*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi str. 32, 450076, Ufa, Russia

<sup>2</sup> LLC Krus-Zapad, Blukher str. 1/2, 450075, Ufa, Russia

<sup>a</sup> medvedevandreyrf@gmail.com

**ABSTRACT**

This work examines samples of bimetallic wires with a copper sheath and a core made of Al-0.4 wt. % Zr alloy. The application of a copper layer with a thickness of  $90 \pm 10$  microns was carried out using the electrochemical method. Copper plating of the surface of aluminium wire leads to a decrease in the elongation to failure to  $3 \pm 0.5\%$ , while increasing the tensile strength (up to 192 MPa) and reducing the level of electrical conductivity to 57.1% IACS. Annealing at 300 °C for 1 hour leads to a twofold increase in the elongation to failure (6.3%), an increase in electrical conductivity to 62.6% IACS, as well as a slight decrease in tensile strength to the level of the original Al-0.4Zr – 176 MPa. Annealing also eliminates the staging of failure in tensile tests, which in unannealed material is caused by subsequent failure of the copper-nickel cladding and aluminium core. In terms of the totality of physical and mechanical properties, the obtained wire samples are not inferior to commercial copper-aluminium bimetallic wires. This method is promising for coating aluminium wires with a thin copper layer of controlled thickness in order to produce conductive elements in which the skin effect is realized.

**KEYWORDS**

Bimetallic materials; copper clad aluminium; CCA wire; electrochemical copper plating; mechanical strength; electrical conductivity; ductility.

**МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТЕРМОСТОЙКОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА Al-0,4 ВЕС.% Zr, ОМЕДНЕННОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*Андрей Евгеньевич Медведев*<sup>1a</sup>, *Кристина Эдуардовна Кирьянова*<sup>1</sup>,  
*Евгений Борисович Медведев*<sup>1</sup>, *Михаил Викторович Горбатков*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

<sup>2</sup> ООО Крус-Запад, Россия, 450075, Уфа, ул. Блюхера, 1/2

<sup>a</sup> medvedevandreyrf@gmail.com

## АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрены образцы биметаллических проволок с медной оболочкой и сердечником из сплава Al-0,4 вес.% Zr. Нанесение медного слоя толщиной  $90 \pm 10$  мкм производилось электрохимическим методом. Омеднение поверхности алюминиевой проволоки приводит к снижению величины относительного удлинения до разрушения до  $3 \pm 0,5\%$ , повышая при этом предел прочности (до 192 МПа), и снижает уровень электрической проводимости до 57,1% IACS. Отжиг при 300 °С в течение 1 ч приводит к двукратному росту величины относительного удлинения до разрушения (6,3%), росту удельной электрической проводимости до 62,6% IACS, а также к незначительному снижению предела прочности до уровня исходной проволоки из сплава Al-0,4Zr – 176 МПа. Отжиг также устраняет стадийность разрушения при испытаниях на растяжение, которая в неотожженном материале вызвана последовательным разрушением медно-никелевой оболочки и алюминиевого сердечника. По совокупности физико-механических свойств полученные образцы проволоки не уступают коммерческим медно-алюминиевым биметаллическим проволокам. Данный способ является перспективным для покрытия алюминиевых проволок тонким медным слоем контролируемой толщины с целью производства токопроводящих элементов, в которых реализуется скин-эффект.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Биметаллические материалы; медно-алюминиевая проволока; электрохимическое омеднение; механические испытания; электропроводность; пластичность.

### Введение

В настоящее время поиск более дешевых альтернатив меди как материала для электротехнического применения является актуальной задачей промышленности. Алюминий является вторым после меди техническим проводником по значению удельной электрической проводимости [1–3]. В то же время алюминий характеризуется меньшей плотностью по сравнению с медью. Соответственно, алюминий и алюминиевые сплавы могут служить альтернативой меди и медным сплавам: при сохранении уровня электропроводности можно выиграть в массе готового изделия [4, 5].

Основным недостатком алюминия является его относительно низкая прочность и пониженная, по отношению к меди, электрическая проводимость. Попытки повысить прочность алюминия путем создания сплавов на его основе или методами пластической деформации обычно приводят к снижению его электропроводности [6–8].

Одним из решений подобной проблемы является применение слоистых металлических композиций. К числу таких материалов относятся биметаллы – композиционный материал, состоящий из двух или более различных слоев металлов или их сплавов. В последние годы биметаллические медно-алюминиевые соединения привлекли интерес многих исследователей из-за их низкой плотности, высокой теплопроводности и электропроводности, а также их конкурентного преимущества по стоимости по сравнению с медью и медными сплавами [9, 10]. Композитные материалы на основе алюминия, покрытого медью, могут быть адаптированы для достижения выдающихся свойств, таких как меньший вес, повышенная теплопроводность, прочность. Их вес может быть уменьшен на 35–50%, а их теплопроводность и электропроводность сравнимы с некоторыми медными сплавами [11, 12].

В настоящее время проволоки из алюминия сплава, покрытые медью, нашли применение в таких областях, как аудиотехника,

высокочастотные электрические проводники, высокоточная техника. Их популярность в данных областях объясняется тем, что при высоких частотах тока электрический заряд идет по приповерхностному слою проводника (т. н. скин-эффект), и при определенной частоте тока весь разряд будет идти по медной оболочке. Глубина скин-эффекта зависит от частоты тока, и для высокочастотных импульсов может достигать десятых и сотых долей миллиметра. Поэтому покрытие алюминиевой проволоки медным слоем контролируемой толщины позволяет добиться снижения массы и стоимости проводника без потери характеристик [13–15].

Получение биметаллических алюмомедных проволок сопряжено с рядом трудностей. В первую очередь это образование интерметаллидных частиц на границе медь-алюминий, которые могут образовываться даже при холодной деформации. Наличие подобных частиц приводит к резкому снижению пластичности проволок и к снижению их электрической проводимости. Также в результате деформационной обработки может сильно снижаться пластичность полученной проволоки. Для повышения пластичности и снижения остаточных напряжений в материалах используется отжиг. Выбор режима температурной обработки является важным вопросом при производстве таких материалов [11, 16].

Относительно свежим подходом к получению медь-алюминиевых биметаллических проволок может служить электрохимическое осаждение меди на алюминиевой проволоке. Такой подход позволяет с более высокой точностью контролировать толщину как медного слоя, так и диффузионного слоя, неизбежно возникающего в такого рода материалах.

В настоящем исследовании была изучена попытка получения электролитическим методом биметаллической проволоки с медной оболочкой и сердечником из алюминиевого

сплава. Если обычно в качестве сердечника используется технически чистый алюминий, то в данной работе был применен электро-технический алюминиевый сплав Al-0,4Zr, характеризующийся высокими значениями электропроводности и термической стабильности [17].

## 1. Методика исследований

Перед электролитической обработкой образцы (прутки сплава Al-0,4 вес.% Zr диаметром 11 мм) были проволочены до диаметра 3,4 мм при комнатной температуре. Перед волочением прутки прошли термическую обработку (отжиг при 375 °С в течение 120 ч). Далее проволока прошла стадию подготовки: химическое обезжиривание в растворе щелочи, промывку в горячей, затем в холодной воде. Затем проводилось осветление в азотной кислоте. Следующим этапом послужил процесс цементации никелем, за которым последовали промывка в холодной воде и омеднение при комнатной температуре в сернокислом электролите в течение двух часов для получения слоя толщиной  $90 \pm 10$  мкм при плотности тока 5 А/дм<sup>2</sup>. Никелевая прослойка является необходимым этапом омеднения алюминия, т.к. медь не осаждается на чистый алюминий [14].

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus Q150R. Для металлографического анализа изготавливали микрошлифы, вырезанные в направлении, перпендикулярном направлению обработки. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) была проведена на микроскопе Tescan MIRA при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Отжиг проводился в атмосферной печи Nabertherm V180. Образцы после отжига охлаждали в воде для удаления окалины с поверхности.

Механические испытания на растяжение проводились на испытательной маши-

не Instron 5589 при комнатной температуре. На каждое состояние испытывалось не менее 3 образцов. Удельное электросопротивление исследуемого материала измеряли в соответствии со стандартом IEC 60468:1974 [18]. Отбирали выпрямленные образцы длиной не менее 1 м. Величину удельной электрической проводимости ( $УЭС$ ) образцов относительно отожженной меди (International Annealed Copper Standard) рассчитывали по формуле:

$$IACS = \omega_{Al} / \omega_{Cu} * 100 [\%],$$

где  $\omega_{Al}$  – экспериментально определенное значение электропроводности образца алюминиевого сплава,  $\omega_{Cu}$  – электропроводность отожженной меди, равная 58 МСм/м.

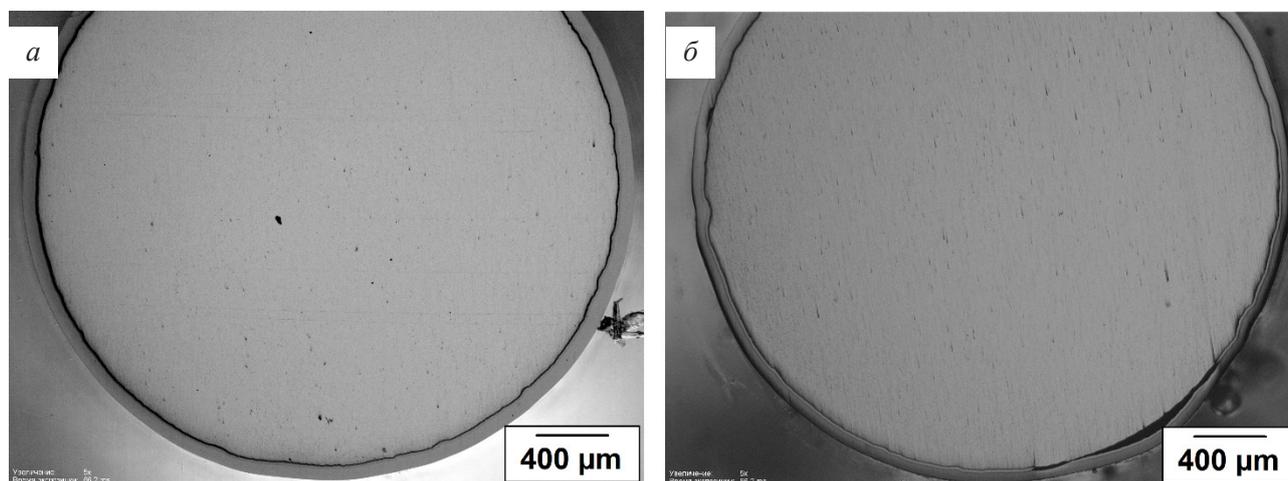
## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты оптической металлографии биметаллической проволоки до и после отжига. Согласно литературным данным, рекомендуемая доля меди в сечении в проволоках типа алюминий-

медь составляет от 10 до 15% [9, 19]. В данном случае доля меди в сечении до отжига составляет 8,4%, после отжига – 6,1%. Также необходимо иметь в виду наличие никелевого слоя.

Согласно рис. 1, а, электролитическое нанесение никеля и меди на проволоку из алюминиевого сплава привело к образованию химического соединения между металлами. На границе металлов отсутствуют поры, крупные интерметаллидные частицы и иные нежелательные дефекты. Граница алюминий-никель характеризуется включением мелких частиц/неровностей, в то время как граница никель-медь кажется сплошной.

Отжиг при 300 °С в течение 1 ч приводит к утончению медно-никелевой оболочки. Утончение медно-никелевой оболочки происходит, с наибольшей вероятностью, вследствие окисления поверхностного слоя меди при отжиге в атмосферной печи и последующего удаления медной окалины. Также происходит отслоение медно-никелевой оболочки от алюминия (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Оптическая металлография поперечного сечения проволоки сплава Al-0,4Zr, покрытого медью до (а) и после отжига (б). На изображениях отчетливо видно алюминиевый сердечник, никелевую прослойку и медную оболочку

**Fig. 1.** Optical metallography of the cross-section of an Al-0.4Zr alloy wire coated with copper before (a) and after annealing (b). The images clearly show the aluminum core, nickel layer and copper shell

В табл. 1 представлены свойства образцов проволок Al-0,4Zr без медного покрытия и с покрытием. Проволока сплава Al-0,4Zr демонстрирует достаточно высокие показатели механической прочности, сохраняя при этом высокий уровень электропроводности. Относительное удлинение проволоки Al-0,4Zr до разрыва составляет 15,9%. Электролитическое омеднение привело к снижению электропроводности и незначительному росту прочности, а также значительно (до 3%) снизило уровень пластичности проволоки. Приведенные выше изменения свойств, вполне вероятно, вызваны наличием хрупкой никелевой прослойки. Такой уровень крайне недостаточен для использования в производстве, и к омедненной проволоке был применен отжиг для повышения пластичности – 300 °С, 1 ч [15]. В результате отжига пластичность материала выросла

относительно приемлемого уровня (6,3%), также выросла электрическая проводимость до уровня, превышающего значения исходной проволоки. Предел прочности снизился, но остался в пределах погрешности относительно исходной проволоки.

Коммерческие перспективы устанавливаются для таких изделий сравнительно высокий уровень электропроводности – 62,9–64,4% в зависимости от состояния и содержания меди [20]. Требования к пределу прочности при растяжении варьируются от 110 до 205 МПа, а к пластичности – от 1 до 15%. Проволоки, произведенные в настоящем исследовании, попадают в интервалы значений, предъявляемые для коммерчески реализуемой биметаллической проволоки как в холоднодеформированном, так и в отожженном состояниях.

**Таблица 1.** Физико-механические свойства проволок сплава Al-0,4Zr

**Table 1.** Physical and mechanical properties of Al-0.4Zr alloy wires

Образец / Sample	Электрические свойства / Electrical properties		Механические свойства / Mechanical properties		
	УЭС, Ом*мм <sup>2</sup> /м / RER, Ω*mm <sup>2</sup> /m	IACS, %	$\sigma_{0.2}$ , МПа / $\sigma_{YS}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа / $\sigma_{UTS}$ , МПа	$\delta$ , %
Al-0,4Zr (без покрытия) / Al-0.4Zr (uncoated)	0,02929	58,9±0,4	177±3	162±4	15,9±0,5
Al-0,4Zr (с покрытием) / Al-0.4Zr (copper coated)	0,03020	57,1±0,5	167±19	192±11	3±0,5
Al-0,4Zr (с покрытием) + 300 °С, 1ч / Al-0.4Zr (copper coated) + 300 °С, 1h	0,02754	62,6±0,6	153±3	176±6	6,3±0,3
Al-10%Cu холодноволооченный / Al-10%Cu hard-drawn [20]	–	>62,9%	–	110–205	>1%
Al-10%Cu отожженный / Al-10%Cu annealed [20]	–	>62,9%	–	135–170	>5–15%
Al-15%Cu холодноволооченный / Al-15%Cu hard-drawn [20]	–	>64,4%	–	110–205	>1%
Al-15%Cu отожженный / Al-15%Cu annealed [20]	–	>64,4%	–	135–170	>5–15%

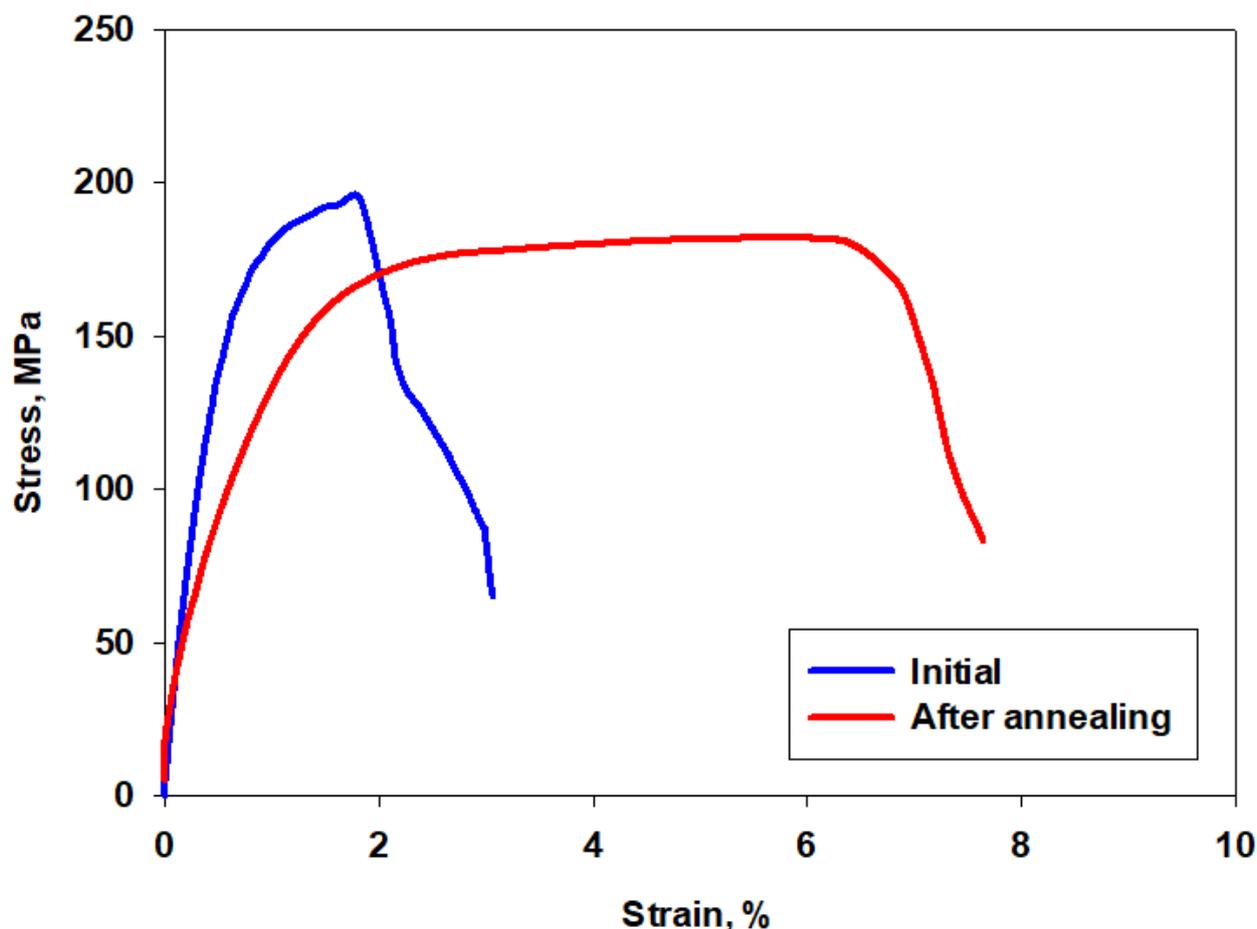


Рис. 2. Инженерные кривые растяжения омедненных проволок Al-0,4Zr до и после отжига

Fig. 2. Engineering stress-strain curves of Al-0.4Zr copper plated wires before and after annealing

На рис. 2 представлены кривые растяжения образцов проволок Al-0,4Zr с медным покрытием до и после отжига. Образцы, полученные электрохимическим методом, склонны к хрупкому разрушению. Отжиг при 300 °С в течение 1 ч приводит к появлению на кривой растяжения стадии пластического течения. Омедненные проволоки как до отжига, так и после характеризуются двуступенчатой кривой, или двуступенчатым разрушением. Первая ступень соответствует разрыву медно-никелевой оболочки, вторая – разрушению медного сердечника.

### Выводы

В данной работе представлены результаты электролитического осаждения меди

на проволоке из алюминиевого сплава с целью получения биметаллического композита. В целом, предложенный метод перспективен для производства алюминиевых проводов с медным покрытием для использования при высоких частотах тока для обеспечения скин-эффекта. Основным преимуществом представленного метода является возможность точного контроля толщины медного слоя до десятков микрон, а также химического состава этого слоя.

1. Получены образцы биметаллического сплава на основе проволоки из сплава Al-0,4Zr, покрытого медью электрохимическим методом. Доля меди в сечении составляет около 8%, на границах раздела металлов отсутствуют видимые дефекты/интерметаллидные частицы.

2. Предел прочности (192 МПа) и удельная электрическая проводимость (57,1% IACS) омедненной алюминиевой проволоки мало отличаются соответствующих характеристик алюминиевой проволоки состава Al-0,4Zr, в то время как относительное удлинение до разрушения значительно уменьшилось (3% против 15,9%).

3. Отжиг биметаллической проволоки при 300 °С в течение 1 ч привел к увеличению электропроводности до 62,6% IACS и относительного удлинения до разрушения до 6,3% при сохранении предела прочности (176 МПа). Данный уровень свойств аналогичен уровню биметаллических медно-алюминиевых проволок, представленных в настоящее время на рынке.

### Благодарности / Acknowledgments

*Авторы выражают особую благодарность Центру коллективного пользования «Нанотех» ФГБОУ ВО «УУНУТ».*

*The authors express special gratitude to the Center for Collective Use “Nanotech” of the Ufa University of Science and Technology.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Draissia M., Debili M.-Y. Study of solid-solution hardening in binary aluminium-based alloys // *Open Physics*. 2005. V. 3, Iss. 3. P. 395–408. DOI: 10.2478/BF02475646.
2. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // *Mater Des*. 2014. V. 56. P. 862–871. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.002.
3. Polmear I., StJohn D., Nie J.-F., Qian M. *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2017. P. 544.
4. Shikagawa T., Itoh G., Suzuki S., Kuroda H., Horikoshi T. Effect of Small Additions of Fe on the Tensile Properties and Electrical Conductivity of Aluminium Wires // *Materials Science Forum*. 2006. V. 519–521. P. 515–518. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.519-521.515.
5. Matveeva I., Dovzhenko N., Sidelnikov S., Trifonov L., Baranov V., Lopatina E. Development and Research of New Aluminium Alloys with Transition and Rare-Earth Metals and Equipment for Production of Wire for Electrotechnical Applications by Methods of Combined Processing / B. A. Sadler (ed.) // *Light Metals 2013. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer, 2013. P. 443–447. DOI: 10.1002/9781118663189.ch76.
6. Valiev R. Z., Murashkin M., Sabirov I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity // *Scr Mater*. 2014. V. 76. P. 13–16. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.12.002.
7. Medvedev A. E., Murashkin M. Yu., Enikeev N. A., Ovid'ko I. A., Valiev R. Z. Strength and electrical conductivity of ultrafine-grained aluminum alloy Al-2Fe subjected to annealing and straining // *Materials Physics and Mechanics*. 2015. Iss. 3. P. 297–307.
8. Sabirov I., Murashkin M. Yu., Valiev R. Z. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development // *Materials Science and Engineering A*. 2013. V. 560. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.020.
9. Sasaki T. T., Morris R. A., Thompson G. B., Syarif Y., Fox D. Formation of ultra-fine copper grains in copper-clad aluminum wire // *Scr Mater*. 2010. V. 63, Iss. 5. P. 488–491. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.05.010.
10. Eivani A. R., Mirzakoochakshirazi H. R., Jafarian H. R. Investigation of joint interface and cracking mechanism of thick cladding of copper on aluminum by equal channel angular pressing (ECAP) // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V. 9, Iss. 3. P. 3394–3405. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.075.
11. Hug E., Bellido N. Brittleness study of intermetallic (Cu, Al) layers in copper-clad aluminium thin wires // *Materials Science and Engineering A*. 2011. V. 528, Iss. 22–23. P. 7103–7106. DOI: 10.1016/j.msea.2011.05.077.
12. Gueydan A., Hug E. Secondary creep stage behavior of copper-clad aluminum thin wires submitted to a moderate temperature level // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. V. 709. P. 134–138. DOI: 10.1016/j.msea.2017.10.044.
13. Zhou L., Ma G., Zhao H., Mou H., Xu J., Wang W., Xing Z., Li Y., Guo W., Wang H. Research status and prospect of extreme high-speed laser cladding technology // *Opt Laser Technol*. 2024. V. 168. Article number 109800. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109800.
14. Cho Y.-R. *Clad Metals: Fabrication, Properties, and Applications* // *Metals (Basel)*. 2021. V. 11, Iss. 8. DOI: 10.3390/met11081186.
15. Lee J. E., Bae D. H., Chung W. S., Kim K. H., Lee J. H., Cho Y. R. Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets // *J Mater Process Technol*. 2007. V. 187–188. P. 546–549. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.121.
16. Gueydan A., Domengès B., Hug E. Study of the intermetallic growth in copper-clad aluminum wires af-

ter thermal aging // *Intermetallics* (Barking). 2014. V. 50. P. 34–42. DOI: 10.1016/j.intermet.2014.02.007.

17. IEC 62641:2023. Conductors for overhead lines - Aluminium and aluminium alloy wires for concentric lay stranded conductors. Rel. 03. 05.2023. P. 24.

18. IEC 60468:1974. Method of measurement of resistivity of metallic materials. Rel. 01.01.1974.

19. Chu D., Zhang J.-Y., Yao J.-J., Han Y.-Q., Wu C. J. Cu–Al interfacial compounds and formation mechanism of copper cladding aluminum composites // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* (English Edition). 2017. V. 27, Iss. 11. P. 2521–2528. DOI: 10.1016/S1003-6326(17)60279-6.

20. MWS Wire Industries. Copper Clad Aluminium, (n.d.) URL: <https://mwswire.com/copper-clad-aluminum/>