

**PRODUCTION OF BIMETALLIC WIRE WITH A CORE OF AL-1.7 WT.% FE ALLOY OBTAINED BY ELECTROMAGNETIC CRYSTALLIZATION AND A SHELL OF COPPER ALLOY GRADE M2**

*Olga Olegovna Zhukova*<sup>1</sup>, *Andrey Evgenievich Medvedev*<sup>1a</sup>, *Aygul Fazirovna Shaykhulova*<sup>2</sup>, *Evgenii Borisovich Medvedev*<sup>3</sup>, *Maxim Yuryevich Murashkin*<sup>1</sup>, *Mikhail Mikhailovich Motkov*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology, Metals and Alloys Under Extreme Conditions Research Laboratory, 32 Zaki Validi st., Ufa, 450076 Russia

<sup>2</sup> Ufa University of Science and Technology, Department of Aviation Engines, 32 Zaki Validi st., Ufa, 450076 Russia

<sup>3</sup> Ufa University of Science and Technology, Department of Materials Science and Physics of Metals, 32 Zaki Validi st., Ufa, 450076 Russia

<sup>4</sup> Siberian Federal University, 26 Kirenskii st., Krasnoyarsk, 660074 Russia

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

**ABSTRACT**

The method of combined cold drawing was used to obtain samples of bimetallic wire with a shell made of copper alloy M2 and a core made of aluminium alloy Al-1.7 wt. % Fe, obtained by casting in an electromagnetic crystallizer. The obtained samples are characterized by the levels of strength, electrical conductivity and ductility that meet the requirements of the ASTM B566 and SJ/T 11223-2000 standards. Due to the use of a thermally stable alloy of the Al-Fe system, it was possible to achieve a uniform drop in the hardness of the copper and aluminium alloys during post-deformation annealing.

**KEYWORDS**

Al; Al-Fe; bimetallic materials; copper clad aluminium wire; CCA wire; mechanical tests; electrical conductivity; ductility; electromagnetic crystallizer.

**ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ СПЛАВА AL-1,7 ВЕС.% FE, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ, И ОБОЛОЧКОЙ ИЗ МЕДНОГО СПЛАВА МАРКИ М2**

*Ольга Олеговна Жукова*<sup>1</sup>, *Андрей Евгеньевич Медведев*<sup>1a</sup>, *Айгуль Фазировна Шайхулова*<sup>2</sup>, *Евгений Борисович Медведев*<sup>3</sup>, *Максим Юрьевич Мурашкин*<sup>1</sup>, *Михаил Михайлович Мотков*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий, НИЛ «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

<sup>2</sup> Уфимский университет науки и технологий, кафедра авиационных двигателей, 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

<sup>3</sup> Уфимский университет науки и технологий, кафедра материаловедения и физики металлов, 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

<sup>4</sup> Сибирский федеральный университет, 660074, Россия, Красноярск, ул. Киренского, 26

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

## АННОТАЦИЯ

Методом совместного холодного волочения были получены образцы биметаллической проволоки с оболочкой из медного сплава М2 и сердечником из алюминиевого сплава Al-1,7 вес.% Fe, полученного методом литья в электромагнитный кристаллизатор. Полученные образцы характеризуются уровнями прочности, электропроводности и пластичности, удовлетворяющими требованиям стандартом ASTM B566 и SJ/T 11223-2000. За счет использования термически стабильного сплава системы Al-Fe удалось добиться равномерного падения твёрдости медного и алюминиевого сплавов во время постдеформационного отжига.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Al; Al-Fe; биметаллические материалы; медно-алюминиевая проволока; механические испытания; электропроводность; пластичность; электромагнитный кристаллизатор.

### Введение

Кабельная промышленность находится в постоянном поиске новых материалов для токопроводящих изделий и продукции. Традиционно основным материалом для кабельной продукции является медь и медные сплавы [1, 2]. Из-за высокой стоимости и массы изделий и продукции из меди при первой возможности их заменяют алюминиевыми сплавами. Такой обмен позволяет снизить массу изделий и продукции, их стоимость, улучшить рециклируемость производства [3–5].

Основным недостатком алюминиевых сплавов является низкая прочность, ограничивающая возможность их применения в определенных областях. Существуют способы повышения прочности алюминиевых сплавов, однако повысить его до значений, соответствующих медным сплавам, не удастся [6]. Поэтому полная замена медных сплавов алюминиевыми на данный момент невозможна.

Тем не менее, существуют области промышленности, в которых требуются материалы, которые характеризовались бы низкой стоимостью и весом, как алюминиевые сплавы, и высокой прочностью и электропроводностью, как медные сплавы. В связи с этим были созданы комбинированные материалы, совмещающие положительные характеристики обоих типов сплавов без их не-

достатков – биметаллические композитные материалы [7].

Биметаллические материалы производятся в различных форм-факторах – полосы, шины, провода, кабели, трубы, ленты и т.д. [8–10]. Так, биметаллические проволоки с сердечником из алюминиевого сплава и оболочкой из медного характеризуются прочностью и электропроводностью, превышающей таковую у алюминия, при этом масса и стоимость такой продукции ниже, чем у цельномедной [11–13].

Другим преимуществом биметаллических алюмомедных проволок является реализация скин-эффекта, при котором высокочастотный ток бежит по тонкому поверхностному слою проводника, а не по всему сечению. При определенной частоте тока глубина скин-эффекта может достичь значений, соответствующих толщине медной оболочки, и проводимость такого биметаллического провода будет такой же, как у цельномедного провода, при этом биметаллический провод будет легче и дешевле [14].

Основным способом получения биметаллических алюмомедных проволок является совместное волочение алюминиевого сердечника и медной оболочки [7]. Есть и другие способы, но они отличаются повышенной сложностью для массового производства [15]. При совместном волочении степень деформации может достигать боль-

ших значений, что требует термической обработки полученной продукции. Вследствие этого существует необходимость проводить отжиг проволоки после деформации для снятия напряжений и/или рекристаллизации. Подобная термическая обработка сопряжена с риском формирования хрупких алюмомедных интерметаллидов на границе медь-алюминий. Чтобы избежать их формирования, подбирается определенная температура отжига [9, 12, 16].

Другим последствием отжига является разупрочнение проволоки, причем разупрочнение алюминиевого сердечника происходит более интенсивно, в частности, из-за того, что в качестве сердечника в большинстве случаев используется технически чистый алюминий, термическая стабильность которого крайне невелика [17]. Большая разница в величине разупрочнения медного и алюминиевого слоев создает повышенный риск преждевременного разрушения проволоки под действием механических нагрузок.

Данная работа направлена на повышение термической стабильности алюмомедных проводников за счет использования сплава Al-1,7Fe вес. % в качестве сердечника в биметаллической проволоке с медной оболочкой. Сплавы системы Al-Fe характеризуются повышенной термической стабильностью [18–20]; кроме того, сплав, использованный в текущем исследовании, был получен методом литья в электромагнитный кристаллизатор. Подобный способ литья за счет высоких скоростей кристаллизации позволяет получить мелкодисперсную структуру слитка, что так-

же положительно сказывается на прочности и термической стабильности сплава [21–23].

## 1. Методика исследований

Прутки сплава Al-1,7 вес.%, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор, диаметром 11 мм были проволочены до диаметра 7,5 мм при комнатной температуре. Полученный прут, предварительно зачищенный и обезжиренный, был помещен в медную трубку марки М2 с внешним диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Полученный образец был подвергнут холодному волочению при комнатной температуре до достижения внешнего диаметра 3 мм. Таким образом, величина обжатия составила 70%.

Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

Исследования микроструктуры проводились 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 B180. Образцы после отжига охлаждали в воде для удаления окалины с поверхности.

Механические испытания на растяжение проводились на испытательной машине Instron 5589 при комнатной температуре. На каждое состояние испытывалось не менее 3 образцов.

**Таблица 1.** Химический состав исследуемых сплавов

**Table 1.** Chemical composition of the studied materials

Сплав / Alloy	Cu	Al	Fe	Σ Ост. / Rem.
Al-1,7Fe	≤0,03	>98,25	1,65	≤0,07
Cu M2	>99,87	≤0,05	≤0,05	≤0,03

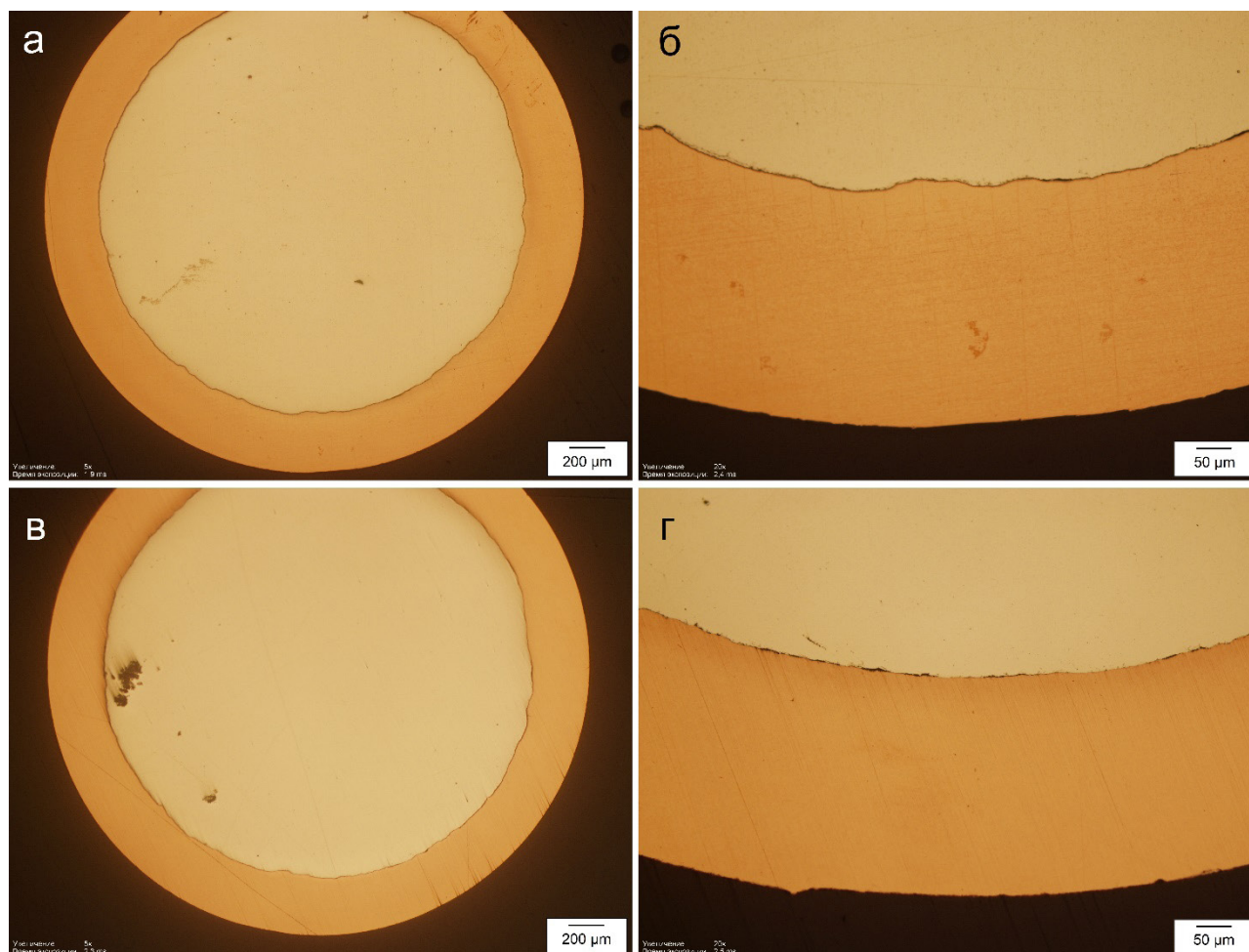
Удельное электросопротивление исследуемого материала измеряли в соответствии со стандартом IEC 60468:1974 [24]. Отбирали выпрямленные образцы длиной не менее 1 м. Величину удельной электрической проводимости (УЭС) образцов относительно отожженной меди (International Annealed Copper Standard) рассчитывали по формуле:

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

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

## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены фотографии поперечных шлифов образца биметаллической проволоки до (а, б) и после (в, г) отжига при 300 °С в течение 1 ч (далее – отжиг). Видно, что толщина медного слоя не меняется после отжига, и толщина меди в сечении составляет в среднем  $37,4 \pm 0,5$  мкм. Интерфейс алюминий-медь, хоть и характеризуется наличием отдельных несплошностей, представляет собой непрерывную поверхность без видимых дефектов и интерметаллидных включений.



**Рис. 1.** Оптическая металлография поперечного сечения проволоки сплава Al-1,7Fe, покрытого медью до (а, б) и после отжига (в, г), ОМ

**Fig. 1.** Optical metallography of the cross-section of an Al-1,7Fe alloy wire coated with copper before (a, б) and after annealing (в, г), ОМ



В табл. 2 представлены физико-механические данные исходной проволоки из сплава Al-1,7Fe, а также омедненной проволоки до и после отжига. В омедненном состоянии проволока характеризуется высокими пределом прочности (380 МПа) и уровнем электропроводности (62,3%IACS) при относительно невысоком уровне пластичности (0,8%). По уровню прочности и электропроводности холодноволооченная биметаллическая проволока удовлетворяет требованиям индустриального стандарта и находится на нижней границе требований по уровню пластичности. В отожженном состоянии биметаллическая проволока сохраняет высокий уровень предела прочности (275 МПа) при повышении уровня электропроводности

(до 65,7%IACS) и пластичности (3,5%). Такие свойства хоть и демонстрируют положительную тенденцию, но не удовлетворяют требованиям промышленных стандартов по уровню предела прочности и пластичности. Также необходимо отметить, что доля меди в исследуемых сплавах в 2–3 раза выше, чем рекомендовано стандартами.

Разупрочнение коммерческих биметаллических проволок после отжига составляет 25,8%, в то время как разупрочнение исследуемой проволоки составило около 27,6%, что с учетом погрешности примерно одно и то же. Тем не менее, абсолютная величина предела прочности исследуемой проволоки после отжига на 50% выше, чем у коммерческого аналога.

**Таблица 2.** Физико-механические свойства проволок сплава Al-1,7Fe

**Table 2.** Physical and mechanical properties of Al-1.7Fe alloy wires

Образец / Sample	Электрические свойства / Electrical properties		Механические свойства / Mechanical properties		
	УЭС, Ом*мм <sup>2</sup> /м / SER, Ω*mm <sup>2</sup> /m	IACS, %	$\sigma_{0,2}$ , МПа / $\sigma_{YS}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа / $\sigma_{UTS}$ , МПа	$\delta$ , %
Al-1,7Fe холодноволооченный / Al-1,7Fe hard-drawn	33,16	52,0±0,4	240±12	295±13	4,8±0,2
Al-1,7Fe омедненный / Al-1,7Fe copper-clad	27,68	62,3±0,3	350±10	380±7	0,8±0,5
Al-1,7Fe омедненный + 300 °C, 1ч / Al-1,7Fe copper-clad + 300 °C, 1h	26,24	65,7±0,2	270±4	275±4	3,5±0,5
Al-10%Cu холодноволооченный / Al-10%Cu hard-drawn [25, 26]	–	>62,9%	–	>186	>1%
Al-10%Cu отожженный / Al-10%Cu annealed [25, 26]	–	>62,9%	–	<138	>15%
Al-15%Cu холодноволооченный / Al-15%Cu hard-drawn [25, 26]	–	>64,4%	–	>186	>1%
Al-15%Cu отожженный / Al-15%Cu annealed [25, 26]	–	>64,4%	–	<138	>15%

На рис. 2 представлены инженерные кривые растяжения для исходной проволоки из сплава Al-1,7Fe, а также для биметаллической проволоки до и после отжига. Если проволока из алюминиевого сплава характеризуется классическим видом кривой растяжения, то на кривых для омедненных проволок присутствует стадия первичного разрушения и стадия долома образца. Подобное поведение связано с последовательным разрушением алюминиевого сердечника и медной оболочки. Стоит также отметить наличие пиков на кривых растяжения перед первой стадией разрушения, которые говорят о резкой локализации деформации.

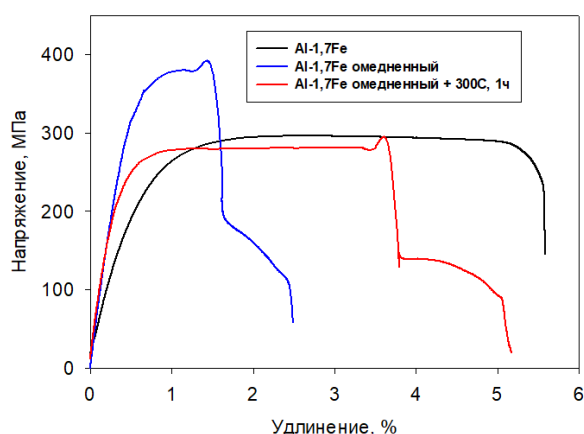


Рис. 2. Инженерные кривые растяжения омедненных проволок Al-1,7Fe до и после отжига

Fig. 2. Engineering stress-strain curves of Al-1,7Fe copper-clad wires before and after annealing

На рис. 3 представлена диаграмма величин микротвердости алюминиевого сердечника и медной оболочки биметаллической проволоки до и после отжига. Отжиг приводит к закономерному падению уровня микротвердости как в алюминиевом, так и в медном сплавах. Величина падения микротвердости сопоставима, а значит, разрыв в уровне механической прочности алюминиевого и медного слоев не меняется во время отжига.

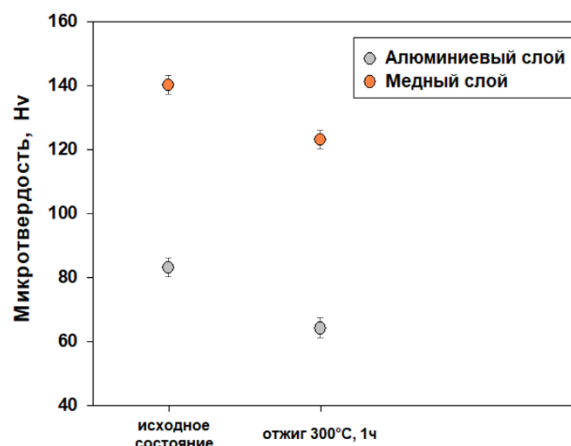


Рис. 3. Изменение микротвердости в алюминиевом и медном слоях биметаллической проволоки после отжига

Fig. 3. Change in microhardness in the aluminum and copper layers of the bimetallic wire after annealing

## Выводы

В рамках данной исследовательской работы был получен биметаллический медно-алюминиевый проводник в виде проволоки диаметром 3 мм методом совместного холодного волочения. В качестве оболочки был выбран медный сплав марки М2, в качестве сердечника – алюминиевый сплав Al-1,7Fe, полученный методом литья в электромагнитный кристаллизатор.

1. Сцепление медного и алюминиевого слоев в результате деформационной обработки удовлетворительное, контакт поверхностей практически непрерывный. На границе медь-алюминий отсутствуют видимые неоднородности и дефекты.

2. Полученная проволока в деформированном состоянии удовлетворяет требованиям международных стандартов для алюминиевых проволок, плакированных медью, по уровню механической прочности, пластичности и электропроводности.

3. За счет использования термически стабильного алюминиевого сплава удалось добиться одинакового уровня снижения микротвердости медной оболочки и сердечника из алюминиевого сплава в результате отжига.

## 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 Ufa University of Science and Technology.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.F. Mondolfo, Aluminum Alloys Structure and Properties, Elsevier Ltd., 1976.
2. Ian Polmear, David StJohn, Jian-Feng Nie, Ma Qian, Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals, 5th ed., Butterworth-Heinemann, 2017.
3. D.I. Belyi, Aluminum alloys for conductors of cable products, Cables and Wires 332 (2012) 8–15.
4. L. Li, G. Liu, D. Pan, W. Wang, Y. Wu, T. Zuo, Overview of the recycling technology for copper-containing cables, Resour Conserv Recycl 126 (2017) 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.024>.
5. J. He, B. Dang, Y. Zhou, J. Hu, Reviews on research progress and key technology in extruded cables for HVDC transmission, Gaodiyana Jishu/High Voltage Engineering 41 (2015) 1417–1429. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2015.05.001>.
6. Y. Liu, B. Zwingmann, M. Schlaich, Carbon fiber reinforced polymer for cable structures—a review, Polymers (Basel) 7 (2015) 2078–2099. <https://doi.org/10.3390/polym7101501>.
7. Y.-R. Cho, Clad Metals: Fabrication, Properties, and Applications, Metals (Basel) 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/met11081186>.
8. J.E. Lee, D.H. Bae, W.S. Chung, K.H. Kim, J.H. Lee, Y.R. Cho, Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets, J Mater Process Technol 187–188 (2007) 546–549. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.121>.
9. A.R. Eivani, H.R. Mirzakoochakshirazi, H.R. Jafarian, 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 9 (2020) 3394–3405. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.075>.
10. Y. Chen, A. Wang, H. Tian, J. Xie, X. Wang, Study on optimization of nozzle for copper-aluminium clad plate twin-roll cast-rolling, Journal of Materials Research and Technology 10 (2021) 1075–1085. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.088>.
11. A. Gueydan, E. Hug, Secondary creep stage behavior of copper-clad aluminum thin wires submitted to a moderate temperature level, Materials Science and Engineering A 709 (2018) 134–138. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.044>.
12. Медведев, А.Е., Кирьянова, К.Э., Медведев, Е.Б. и Горбатков, М.В. 2023. Микроструктура и свойства термостойкой алюминиевой проволоки из сплава Al-0,4 вес. % Zr, омедненной электрохимическим методом. Materials. Technologies. Design. 5, 4 (14) (дек. 2023), 55–62. DOI: [https://doi.org/10.54708/26587572\\_2023\\_541455](https://doi.org/10.54708/26587572_2023_541455).
13. X. Liu, X. Liu, J. Xie, Effects of annealing process on interface and mechanical properties of silver clad aluminum wires, in: Procedia Eng, Elsevier Ltd, 2012: pp. 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.479>.
14. L. Weisenberger, B. Durkin, Copper Plating, Surface Engineering, ASM International, 1996.
15. A.E. Medvedev, K.E. Kiryanova, E.B. Medvedev, M. V Gorbatkov, M.M. Motkov, Microstructure and properties of the Al-0,5 wt.% Fe alloy wire, copper-clad by electrochemical deposition, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.08.001>.
16. T.T. Sasaki, R.A. Morris, G.B. Thompson, Y. Syarif, D. Fox, Formation of ultra-fine copper grains in copper-clad aluminum wire, Scr Mater 63 (2010) 488–491. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.05.010>.
17. L. F. Mondolfo and Otto Zmeskal, Engineering metallurgy, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1955.
18. A.E. Medvedev, O.O. Zhukova, D.D. Fedotova, M.Yu. Murashkin, The mechanical properties, electrical conductivity, and thermal stability of a wire made of Al–Fe alloys produced by casting into an electromagnetic crystallizer, Frontier Materials & Technologies 3 (2022) 96–105.
19. A. Medvedev, O. Zhukova, N. Enikeev, V. Kazykhanov, V. Timofeev, M. Murashkin, The Effect of Casting Technique and Severe Straining on the Microstructure, Electrical Conductivity, Mechanical Properties and Thermal Stability of the Al–1.7 wt.% Fe Alloy, Materials 16 (2023) 3067. <https://doi.org/10.3390/ma16083067>.
20. Магомедова, Д. К. (2021). Влияние геометрии и размера зерна на механические свойства Al 6101 при статическом растяжении цилиндрических образцов. Materials. Technologies. Design, 3(2(4)), 20–24. [https://doi.org/10.54708/26587572\\_2021\\_32420](https://doi.org/10.54708/26587572_2021_32420)
21. N.O. Korotkova, N.A. Belov, V.N. Timofeev, M.M. Motkov, S.O. Cherkasov, Influence of Heat Treatment on the Structure and Properties of an Al–7% REM Conductive Aluminum Alloy Casted in

an Electromagnetic Crystallizer, *Physics of Metals and Metallography* 121 (2020) 173–179. <https://doi.org/10.1134/S0031918X2002009X>.

22. N. Belov, T. Akopyan, N. Korotkova, M. Murashkin, V. Timofeev, A. Fortuna, Structure and properties of ca and zr containing heat resistant wire aluminum alloy manufactured by electromagnetic casting, *Metals (Basel)* 11 (2021) 1–15. <https://doi.org/10.3390/met11020236>.

23. N. Belov, M. Murashkin, N. Korotkova, T. Akopyan, V. Timofeev, Structure and properties of

Al–0.6 Wt.%Zr wire alloy manufactured by direct drawing of electromagnetically cast wire rod, *Metals (Basel)* 10 (2020) 1–11. <https://doi.org/10.3390/met10060769>.

24. IEC 60468:1974 Method of measurement of resistivity of metallic materials.

25. ASTM B566. Standard Specification for Copper-Clad Aluminium Wire, (2002).

26. SJ/T 11223-2000. Copper-clad aluminum wire, (2000).