

**PROPERTIES OF BIMETALLIC WIRE WITH COPPER SHEATH
AND AL-0.5Fe-0.3Cu ALLOY CORE OBTAINED BY CASTING
IN AN ELECTROMAGNETIC CRYSTALLIZER**

*Olga Olegovna Zhukova ¹, Andrey Evgenievich Medvedev ^{1a},
Kristina Eduardovna Kiryanova ², Evgenii Borisovich Medvedev ²,
Mikhail Mikhailovich Motkov ³*

¹ Ufa University of Science and Technology, Metals and Alloys Under Extreme Impacts Research Laboratory, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

² Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

³ Siberian Federal University, 26 Kirenskii St., 660074, Krasnoyarsk, Russia

^a medvedevandreyrf@gmail.com

ABSTRACT

In this study, the samples of bimetallic wire with a diameter of 3 mm with a core made of economically alloyed Al-0.5Fe-0.3Cu and a sheath made of copper alloy grade M2 were obtained by the method of combined drawing. The obtained samples are characterized by a good adhesion of layers without visible defects. Annealing of the wire obtained by cold drawing, aimed at increasing ductility, led to the formation of a set of properties exceeding those of commercially available bimetallic aluminum-copper wires. The further direction of the study is to find the optimal proportion of copper in the conductor volume to minimize its consumption while maintaining an attractive set of properties.

KEYWORDS

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

**СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ С МЕДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ
И СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ СПЛАВА AL-0,5FE-0,3CU, ПОЛУЧЕННОГО ЛИТЬЕМ
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР**

*Ольга Олеговна Жукова ¹, Андрей Евгеньевич Медведев ^{1a},
Кристина Эдуардовна Кирьянова ², Евгений Борисович Медведев ²,
Михаил Михайлович Мотков ³*

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

² Уфимский университет науки и технологий, 450076 Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

³ Сибирский федеральный университет, 660074, Россия, Красноярск, ул. Киренского, 26

^a medvedevandreyrf@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В данной работе методом совместного волочения получены образцы биметаллической проволоки диаметром 3 мм с сердечником из экономнолегированного сплава Al-0,5Fe-0,3Cu и оболочкой из медного сплава марки М2. Полученные образцы характеризуются хорошей адгезией слоев без видимых дефектов. Отжиг полученной холодным волочением проволоки, направленный на повышение пластичности, привел к формированию комплекса свойств, превышающих аналогичные у коммерчески реализуемых биметаллических алюмомедных проволок. Дальнейшее направление исследования заключается в поиске оптимальной доли меди в объеме проводника с целью минимизации ее расхода при сохранении привлекательного комплекса свойств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

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

Введение

Медь играет ключевую роль в различных промышленных секторах, включая машиностроение, строительство, электротехнику, однако, его применение ограничивается экономическими факторами. Вследствие этого актуальной задачей электротехнической отрасли становится поиск более доступных альтернатив меди и медным сплавам, в роли которого обычно выступает алюминий [1, 2].

Главным недостатком алюминия считается его сравнительно низкая прочность и уменьшенная, по сравнению с медью, электрическая проводимость [3]. Попытки улучшить прочность алюминия через создание различных сплавов или с помощью методов пластической деформации обычно приводят к снижению его электропроводности [4, 5].

Поскольку отдельные металлы и сплавы в ряде случаев не могут обеспечить необходимый набор свойств, слоистые металлические композиты находят широкое применение [6, 7]. Слоистые металлические композиты успешно применяются в электрических и электронных компонентах благодаря таким преимуществам, как высокая электрическая проводимость, низкая плотность, хорошие прочностные характеристики и стоимость. Примером таких материалов являются биметаллы – композиционные материалы, состо-

ящие из двух различных слоев металлов или их сплавов [8, 9].

Так, композитные материалы на основе алюминия, плакированного медью, могут быть использованы для достижения выдающихся свойств, включая меньший вес, эффективную тепло- и электропроводность, высокую прочность. Использование таких материалов может снизить вес продукции на 35–50%, при этом их теплопроводность и электропроводность сопоставимы с характеристиками некоторых медных сплавов [10].

Основным способом получения алюминиевых проволок, плакированных медью, является механический метод, при котором медная лента наматывается на алюминиевую проволоку, а затем происходит совместное волочение [11]. Альтернативным методом является совместное литье, за которым следует волочение или прокатка [7].

В результате деформационной обработки уровень пластичности полученной проволоки может существенно снижаться, так как степени деформации могут достигать 85–90%. Для увеличения пластичности и снижения остаточных напряжений в материалах часто применяют отжиг. Однако отжиг в биметаллических медно-алюминиевых проволоках может как способствовать повышению пластичности медных и алюми-

ниевых слоев, так и приводить к формированию и росту интерметаллидных частиц на границе раздела медь-алюминий [12–14]. Таким образом, выбор режима температурной обработки становится ключевым аспектом при производстве таких композитных материалов, требующим тщательной настройки, чтобы достичь необходимого баланса между прочностью, пластичностью и электропроводностью.

Обычно в качестве материала для сердечника в биметаллических проволоках выступает технически чистый алюминий вследствие его доступности и дешевизны. Термическая стабильность технически чистого алюминия крайне низкая, и при отжиге после волочения алюминиевый сердечник в значительной степени разупрочняется, приводя к снижению прочности всего композита [15, 16]. Для избежания этого эффекта целесообразно использовать термически стабильные алюминиевые сплавы в качестве сердечника в таких композитах.

В настоящем исследовании была предпринята попытка получения биметаллической проволоки с медной оболочкой и сердечником из термически стабильного алюминиевого сплава методом совместного волочения. В отличие от традиционного подхода, где в качестве сердечника используется технически чистый алюминий, в данной работе был применен электротехнический алюминиевый сплав Al-0,5Fe-0,3Cu, полученный литьем в электромагнитный кристаллизатор. Исследование направлено на оценку свойств полученной проволоки, а также на понимание влияния химического

состава сердечника на свойства биметаллического проводника.

1. Методика исследований

Прутки сплава Al-0,5Fe-0,3Cu вес.%, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор, диаметром 11 мм были проволочены до диаметра 7 мм при комнатной температуре. Полученный прутки, 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.

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 alloys

Сплав / Alloy	Cu	Al	Fe	Σ Ост. / Rem.
Al-0,5Fe-0,3Cu	0,34	>99,04	0,55	≤0,07
Cu M2	>99,87	≤0,05	≤0,05	≤0,03

Удельное электросопротивление исследуемого материала измеряли в соответствии со стандартом IEC 60468:1974 [17]. 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 ω_{Al} – экспериментально определенное значение электропроводности образца алюминиевого сплава; ω_{Cu} – электропроводность отожженной меди, равная 58 МСм/м.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения поперечных шлифов омедненного образца сплава Al-0,5Fe-0,3Cu (copper-clad, CC) (рис. 1, а, б) и образца после отжига

при 300 °С в течение 1 ч (copper-clad annealed, CC-A) (рис. 1, в, г). Видно, что в образце CC граница раздела медь-алюминий сплошная, без видимых включений или неоднородностей/несплошностей. Поверхность алюминиевой проволоки не подвергалась дополнительной механической обработке после волочения до 7 мм, поэтому присутствуют отклонения по ее диаметру, и, соответственно, толщине медной оболочки. Тем не менее, вариации по толщине медного слоя составляют не более 10 мкм при общей толщине 300 мкм в среднем. Отжиг не привел к изменению границы раздела (рис. 1, в, г), что ожидаемо, так как условия термической обработки были выбраны такими, чтобы формирование нежелательных интерметаллидов не успело начаться. Толщина медного слоя в результате отжига остается без изменений. Доля меди в сечении в образцах CC и CC-A составляет $37,5 \pm 0,2\%$. μm

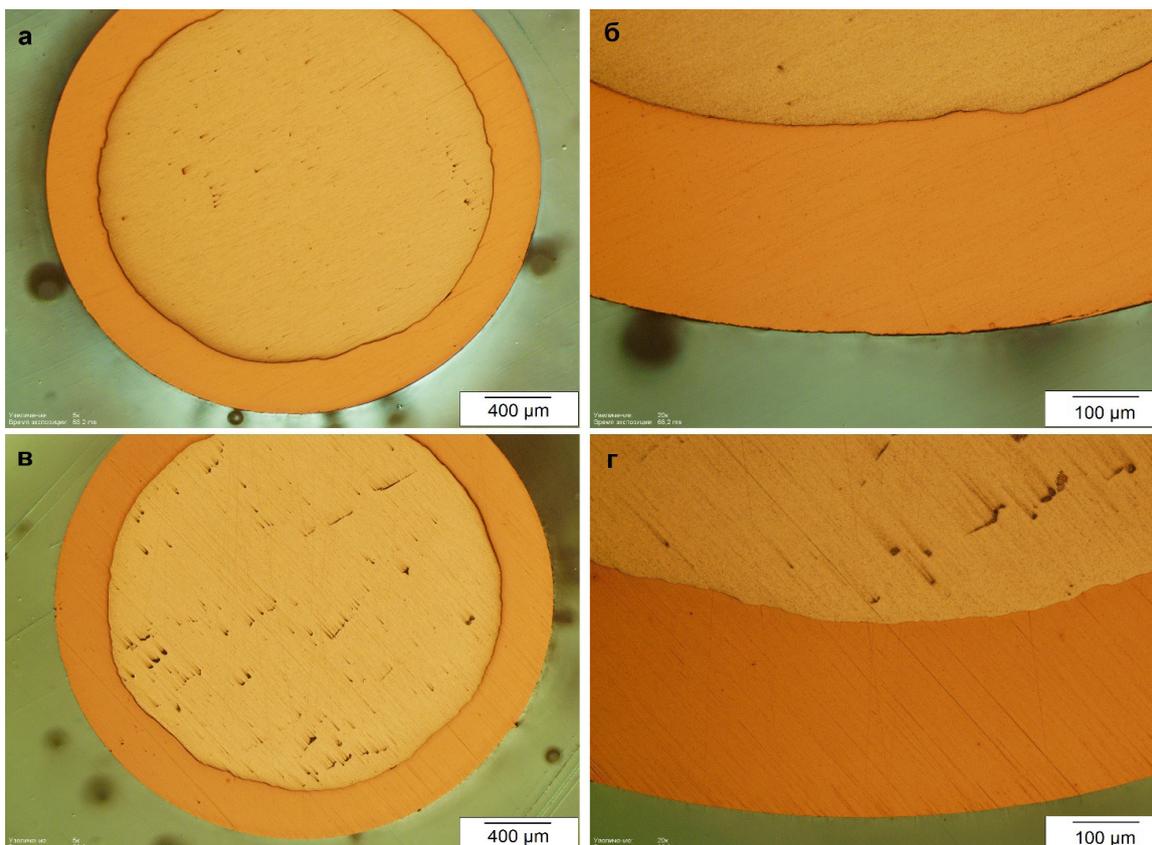


Рис. 1. Оптическая металлография поперечного сечения проволоки сплава Al-0,5Fe-0,3Cu, покрытого медью до (а, б) и после отжига (в, г), ОМ

Fig. 1. Optical metallography of the cross-section of an Al-0.5Fe-0.3Cu alloy wire coated with copper before (a, б) and after annealing (в, г), ОМ

В табл. 2 приведены свойства проволок СС и СС-А. Если проволока из алюминиевого сплава Al-0,5Fe-0,3Cu характеризуется высокими значениями прочности ($\sigma_B = 261$ МПа) и электропроводности (55,8% IACS) при весьма низких показателях пластичности (2,3%), то образец СС характеризуется повышенными прочностью ($\sigma_B = 360$ МПа) и электропроводностью (65,4% IACS) при значительном снижении пластичности практически до нуля (0,5%). Отжиг омедненного образца привел к закономерному снижению прочности до уровня исходной проволоки ($\sigma_B = 250$ МПа), при этом значения электропроводности (68,0% IACS) и пластичности (7,5%) выросли, превысив значения исходной проволоки из алюминиевого сплава Al-0,5Fe-0,3Cu ($\sigma_B = 261$ МПа, 55,8% IACS и 2,3%, соответственно).

Для сравнения в табл. 2 приведены значения свойств проволоки из технически чистого алюминия с медной оболочкой, которые производятся в промышленном масштабе и реализуются на рынке. Видно, что в деформированном состоянии (hard-drawn) предлагаемая в данном исследовании проволока проигрывает коммерческим аналогам толь-

ко в пластичности, значительно выигрывая в прочности и электропроводности. Что касается отожженного состояния (annealed), то предлагаемая в данном исследовании проволока из сплава Al-0,5Fe-0,3Cu с оболочкой из меди марки М2 выигрывает по всем показателям. Стоит отметить, что доля меди в полученной исследователями проволоке вдвое превышает рекомендуемые для такой продукции значения, что может влиять на комплекс получаемых свойств.

На рис. 2 приведены инженерные кривые растяжения образцов исходной проволоки, СС и СС-А. Если исходный образец разрушается по схеме, стандартной для алюминиевых сплавов, то СС образец характеризуется двухстадийным разрушением – сначала разрушается медная оболочка, затем сердечник из алюминиевого сплава. С учетом того, что общее относительное удлинение до разрушения составляет 0,5%, разрушение каждого из слоев можно считать хрупким. Двухстадийное разрушение также характерно для СС-А образца, но разрушение имеет гораздо более вязкий характер и наступает значительно позже – относительное удлинение до разрушения составляет 7,5% (табл. 2).

Таблица 2. Физико-механические свойства проволок сплава Al-0,5Fe-0,3Cu

Table 2. Physical and mechanical properties of Al-0.5Fe-0.3Cu alloy wires

Образец / Sample	Электрические свойства / Electrical properties		Механические свойства / Mechanical properties		
	УЭС, Ом*мм ² /м / RER, Ω*mm ² /m	IACS, %	$\sigma_{0,2}$, МПа / σ_{ys} , МПа	σ_B , МПа / σ_{UTS} , МПа	δ , %
Al-0,5Fe-0,3Cu холодноволооченный / Al-0.5Fe-0.3Cu hard-drawn	0,03089	55,8±0,5	234±2	261±1	2,3±0,4
Al-0,5Fe-0,3Cu омедненный / Al-0.5Fe-0.3Cu copper-clad	0,02636	65,4±0,6	340±4	360±5	0,5±0,2
Al-0,5Fe-0,3Cu омедненный+300 °С, 1h / Al-0.5Fe-0.3Cu copper-clad+300 °С, 1h	0,02536	68,0±0,6	216±5	250±7	7,5±0,3
Al-10%Cu холодноволооченный / Al-10%Cu hard-drawn [18]	–	>62,9%	–	110–205	>1%
Al-10%Cu отожженный / Al-10%Cu annealed [18]	–	>62,9%	–	135–170	>5–15%
Al-15%Cu холодноволооченный / Al-15%Cu hard-drawn [18]	–	>64,4%	–	110–205	>1%
Al-15%Cu отожженный / Al-15%Cu annealed [18]	–	>64,4%	–	135–170	>5–15%

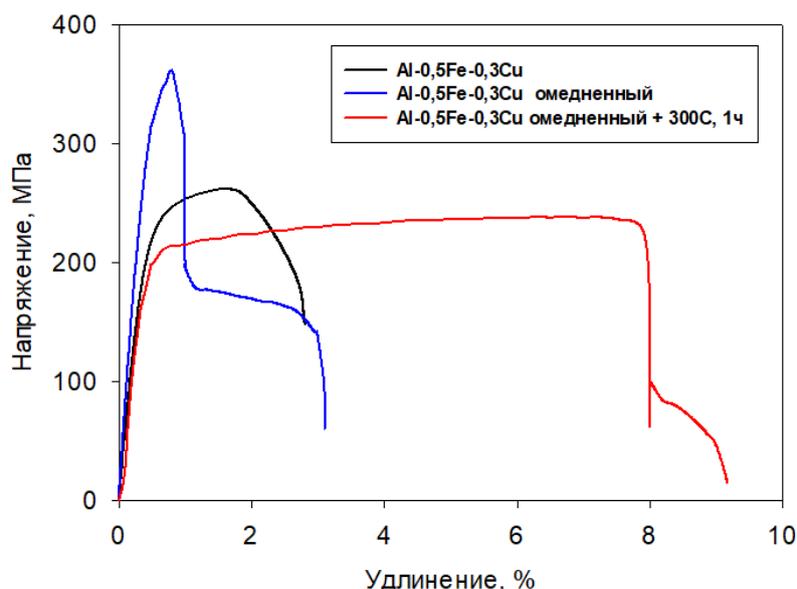


Рис. 2. Инженерные кривые растяжения омедненных проволок Al-0,5Fe-0,3Cu до и после отжига

Fig. 2. Engineering stress-strain curves of Al-0.5Fe-0.3Cu copper-clad wires before and after annealing

Выводы

В данном исследовании был получен композитный биметаллический проводник в виде проволоки диаметром 3 мм. В качестве сердечника был использован алюминиевый сплав Al-0,5Fe-0,3Cu, полученный методом литья в электромагнитный кристаллизатор, в качестве оболочки – медь марки М2. Проводник был получен методом совместного волочения в твердом состоянии.

1. Полученный биметаллический проводник характеризуется хорошим соединением медного и алюминиевого слоев. Проведенный отжиг при 300 °С в течение 1 ч не привел к видимому образованию интерметаллидных соединений на границе раздела слоев. Доля меди в сечении проводника составляет 37% в среднем.

2. Композитный проводник в холодноволооченном состоянии характеризуется повышенными прочностью (360 МПа) и электропроводностью (65,4% IACS), но крайне низкой пластичностью (0,5%). Отжиг биметаллической проволоки привел к снижению предела прочности проволоки до

значения исходной алюминиевой проволоки (до 250 МПа), при этом спровоцировав значительный рост электропроводности (до 68,0% IACS) и пластичности (до 7,5%).

3. Полученный биметаллический проводник характеризуется комплексом свойств, превышающим рекомендуемые для промышленных алюмомедных проводников. Необходимо отметить, что подобный эффект был получен на образцах, доля меди в сечении которых в 2–3 раза превышает значение аналогов, так что для более адекватного сравнения требуются дополнительные исследования. Тем не менее, предложенный в статье подход имеет показавшую свою перспективность.

Благодарности / Acknowledgments

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

The authors express special gratitude to the Center for Collective Use “Nanotech” of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “UUST”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ian Polmear, David StJohn, Jian-Feng Nie, Ma Qian, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, 5th ed., Butterworth-Heinemann, 2017.
2. M. Shaban, M.A. Salam, S.P. Ang, W. Voon, Induced sheath voltage in power cables: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016) 1236–1251. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.032>.
3. L.F. Mondolfo, *Aluminum Alloys Structure and Properties*, Elsevier Ltd., 1976.
4. K. Lee, Y. Song, S. Kim, M. Kim, J. Seol, K. Cho, H. Choi, Genetic design of new aluminum alloys to overcome strength-ductility trade-off dilemma, *J Alloys Compd* 947 (2023) 169546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169546>.
5. M. GENC, P. Eloi, J.-J. Blandin, C. Pascal, P. Donnadieu, F. De Geuser, P. Lhuissier, C. Desrayaud, G. Martin, Optimization of the strength vs. conductivity trade-off in an aluminium alloy designed for laser powder bed fusion, *Materials Science and Engineering: A* 858 (2022) 144139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144139>.
6. Д. К. Магомедова, «Влияние геометрии и размера зерна на механические свойства Al 6101 при статическом растяжении цилиндрических образцов», *MTD*, т. 3, вып. 2(4), сс. 20–24, авг. 2021.
7. Y.-R. Cho, *Clad Metals: Fabrication, Properties, and Applications*, *Metals (Basel)* 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/met11081186>.
8. 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>.
9. R. Kocich, Effects of twist channel angular pressing on structure and properties of bimetallic Al/Cu clad composites, *Mater Des* 196 (2020) 109255. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109255>.
10. Е. А. Шабалин, Т. А. Муратаев, и Ф. И. Муратаев, «Влияние количества интерметаллида CuAl₂ на микротвердость сварного соединения», *MTD*, т. 3, вып. 2(4), сс. 37–42, авг. 2021.
11. 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) (in press). <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.08.001>.
12. E. Hug, N. Bellido, Brittleness study of intermetallic (Cu, Al) layers in copper-clad aluminium thin wires, *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 7103–7106. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.077>.
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. A. Gueydan, B. Domengès, E. Hug, Study of the intermetallic growth in copper-clad aluminum wires after thermal aging, *Intermetallics (Barking)* 50 (2014) 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2014.02.007>.
15. F. Průša, V. Kučera, D. Vojtěch, An Al-17Fe alloy with high ductility and excellent thermal stability, *Mater Des* 132 (2017) 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.027>.
16. Z. Bian, S. Dai, L. Wu, Z. Chen, M. Wang, D. Chen, H. Wang, Thermal stability of Al–Fe–Ni alloy at high temperatures, *Journal of Materials Research and Technology* 8 (2019) 2538–2548. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.028>.
17. IEC 60468:1974 Method of measurement of resistivity of metallic materials, (n.d.).
18. MWS Wire Industries. Copper Clad Aluminium, (n.d.). <https://mwswire.com/copper-clad-aluminum/> (accessed October 17, 2023).