

УДК 614.841.2.001.2

DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0028

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ОМЕДНЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДНИКОВ
ПОДВЕРЖЕННЫХ ТЕРМИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ
МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА**

© 2022

Парийская Анна Юрьевна, научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий
в экспертизе пожаров Исследовательского центра экспертизы пожаров

Мокряк Анна Васильевна, научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий
в экспертизе пожаров Исследовательского центра экспертизы пожаров

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

(193079, г. Санкт-Петербург, Октябрьская набережная, д. 35,

e-mails: anna_par.74@mail.ru, mokryakanna@mail.ru)

Аннотация. Алюминиевый провод с медным покрытием (ССАВ или ССА) представляет собой электрический проводник, состоящий из внутреннего алюминиевого сердечника и внешней медной оболочки. Спрос на омедненные провода постоянно растёт, поскольку этот материал дешевле и легче, чем чистый медный провод, имеет более высокую электропроводность и прочность, чем у чистого алюминия, а электрические соединения обычно более надёжны, чем у чистого алюминия. Изделия из металлов и сплавов относятся к объектам экспертных исследований, представляющих наибольший интерес. С одной стороны, они в большинстве случаев сохраняются после пожара, с другой – происходящие в них изменения протекают в широком температурном диапазоне и могут быть зафиксированы многими аналитическими методами, такими как рентгенофазовый анализ. В данной статье исследованы изменения фазового состава омедненных алюминиевых проводников в температурном диапазоне 100 – 600°C и выдержках от 15 до 45 мин, методом рентгенофазового анализа. Установлено, что при температуре 300°C появляется новая фаза интерметаллид Al_2Cu , а дифракционный пик меди при отжиге 400°C полностью исчезает [1-6].

Ключевые слова: рентгенофазовый анализ, фаза, интерметаллиды, дифрактометр, дифрактограмма, омедненный алюминиевый проводник, биметаллический провод.

**INVESTIGATION OF THE PHASE COMPOSITION OF COPPER-PLATED ALUMINUM CONDUCTORS
EXPOSED TO THERMAL EFFECTS BY X-RAY PHASE ANALYSIS**

© 2022

Pariyskaya Anna Yuryevna, researcher of the department of calculative methods and informational technologies
in the fire expertise Fire Expertise Research Centre

Mokryak Anna Vasievna, researcher of the department of calculative methods and informational technologies
in the fire expertise Fire Expertise Research Centre

Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

(193079, St. Petersburg, Oktyabrskaya emb., 35, e-mails: anna_par.74@mail.ru, mokryakanna@mail.ru)

Abstract. Copper-coated aluminum wire (CCAW or CCA) is an electrical conductor consisting of an inner aluminum core and an outer copper shell. The demand for copper-plated wires is constantly growing, because this material is cheaper and lighter than pure copper wire, has higher electrical conductivity and strength than pure aluminum, and electrical connections are usually more reliable than pure aluminum. Products made of metals and alloys belong to the objects of expert research of the greatest interest. On the one hand, in most cases they persist after a fire, on the other hand, the changes occurring in them occur in a wide temperature range and can be recorded by many analytical methods, such as X-ray phase analysis. In this article, the changes in the phase composition of copper-plated aluminum conductors in the temperature range of 100-600° C and exposures from 15 to 45 minutes are investigated by X-ray phase analysis. It was found that at a temperature of 300° C, a new phase of Al_2Cu intermetallic compounds appears, and the diffraction peak of copper completely disappears during annealing at 400° C.

Keywords: X-ray phase analysis, phase, intermetallics, diffractometer, diffractogram, copper-plated aluminum conductor, bimetallic wire.

Введение. В последнее время для изготовления проводников все чаще используются более дешёвые материалы – алюминий или алюминий с медным покрытием (биметаллические провода). Биметаллические провода сочетают в себе характеристики двух металлов в одном композите. Алюминиевый провод с медным покрытием представляет собой электрический проводник, состоящий из внутреннего алюминиевого сердечника и внешней медной оболочки.

Объединение двух металлов в одном изделии позволяет совместить низкое удельное сопротивление медной внешней оболочки для проводимости и невесомость и дешевизну сердечника из алюминиевого провода.

Омедненные алюминиевые провода относятся к объектам экспертных исследований, однако, в экспертной практике данные провода мало изучены и исследованы.

Как известно, при термическом воздействии биметаллических проводов, из-за диффузии между медью и алюминием образуются интерметаллические соединения (ИМС) [1, 18-20]. Из литературы [2, 13-16] известно, что при температуре 300 - 400°C в алюминиевых проволоках с медным покрытием вблизи границы Cu/Al могут образовываться интерметаллические микроструктуры Al_2Cu , $AlCu$ и Al_4Cu_9 , появление которых сопровождается процессом объемной диффузии.

Целью данной работы является получение информации об изменении фазового состава омедненных алюминиевых проводников при термическом воздействии, для оценки степени термического воздействия.

Материалы и результаты исследования. Образцы проводников нагревались в муфельной печи МИМП – 10 П с программным управлением. Воздействие внешнего тепла пожара моделировалось следующим образом: в не разогретую муфельную печь помещали образцы омедненных алюминиевых проводников без изоляции.

Отжиг проводников без изоляции проводился в муфельной печи при следующих условиях:

- температура нагрева: 100 – 600°C (с шагом 100°C);
- скорость нагрева: 15° град/мин;
- время выдержки образцов: 15, 30, 45 мин;
- охлаждение до комнатной температуры - медленное, при открытой дверце в муфельной печи.

Последовательность фазовых превращений исследовали посредством рентгенофазового анализа исходных образцов, а также образцов после нагрева от 100 до 600°C, с интервалом в 100° с выдержкой соответственно 15, 30 и 45 мин. Исследование проводилось на рентгеновском дифрактометре РАДИАН ДР-01.

Интервал углов составил 34 - 60°, шаг 0,05, экспозиция - 4. Данный интервал углов, при котором проводилась съемка был выбран как самый показательный с наиболее интенсивными пиками алюминия, меди и тех фаз, которые могут образоваться в результате реакции.

Фазовый состав омедненного алюминиевого проводника состоит из следующих фаз: алюминий (d/n – 2.33 и 2.02) и медь (d/n – 2.08 и 1.8). При нагревании возможно образование новых фаз: оксид меди (d/n – 2.45 и 2.12) и интерметаллида Al_2Cu [7-10, 12, 17].

В результате проведенного рентгенофазового анализа исследуемых образцов были получены дифрактограммы и проведена их расшифровка.

По результатам расшифровки установлено, что в исходном образце на дифрактограмме присутствуют дифракционные пики с аналитическими линиями: d/n -2,35 и 2,03 принадлежащие Al , а также линии d/n -2,10 и 1,8 принадлежащие меди Cu (рис. 1).

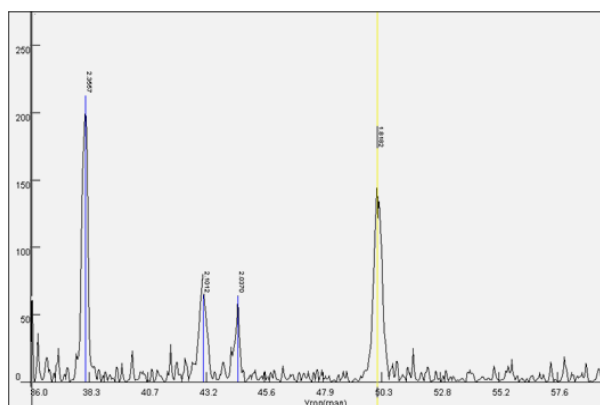


Рисунок 1 – Дифрактограмма исходного образца

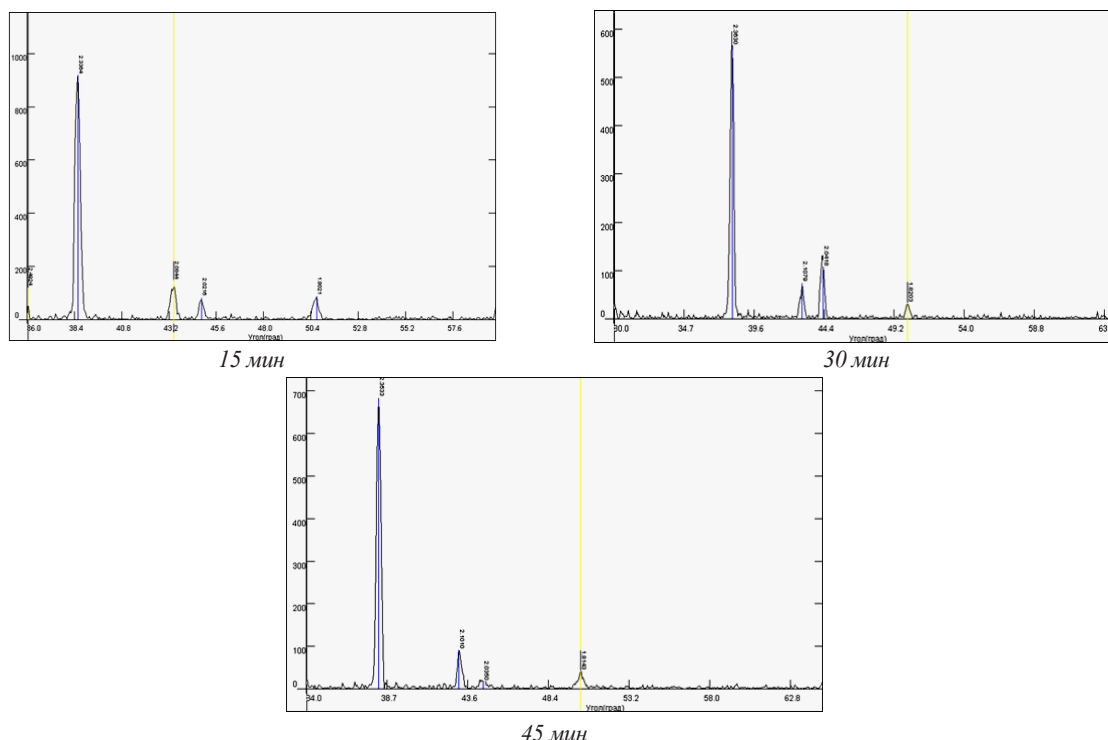


Рисунок 2 – Дифрактограмма образца отожженного при 100°C и различной выдержке

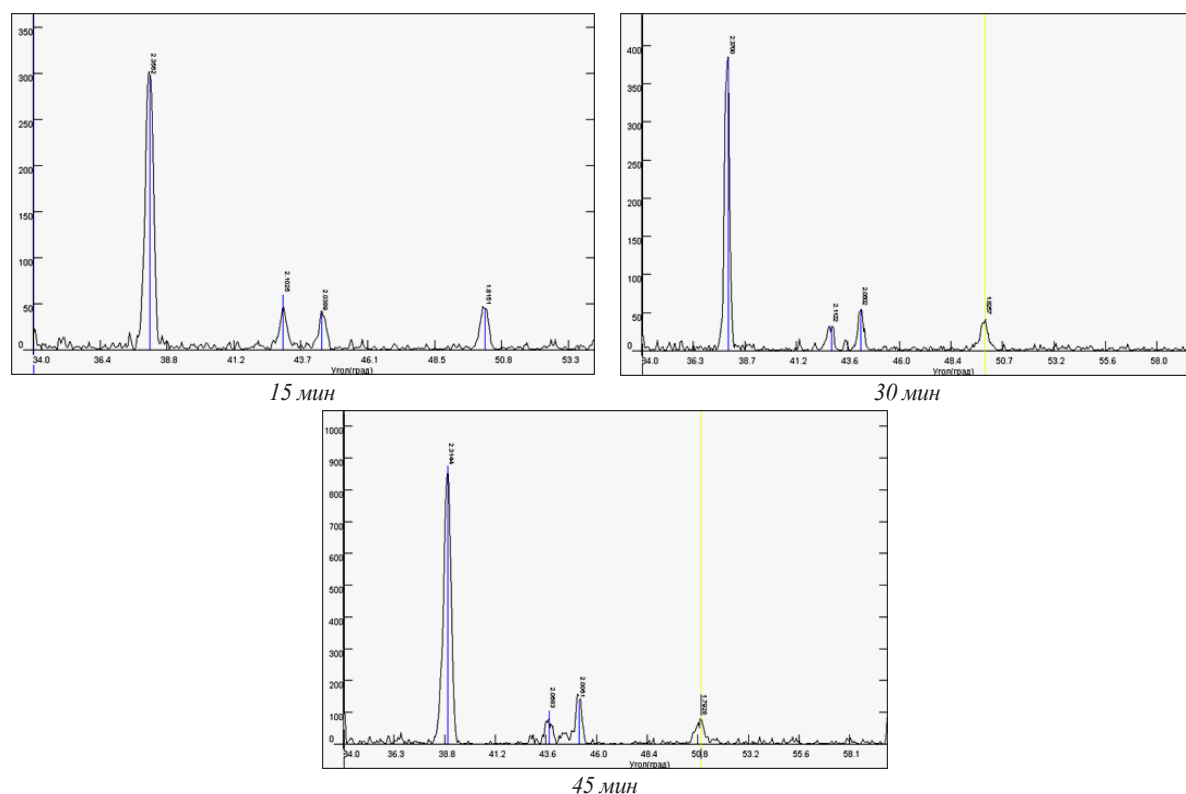


Рисунок 3 – Дифрактограмма образца отожженного при 200°C и различной выдержке

На дифрактограммах отожженных проводов при 100 и 200°C видно, что присутствуют те же пики, что и в исходном образце (рис. 2, 3). Время выдержки при этих температурах не оказывает влияние на фазовый состав проводников.

Фазовые превращения начинаются при температуре 300°C и выдержке 45 мин. и далее. Появляется новая фаза – интерметаллид Al_2Cu [3,4]. Основные аналитические линии этого соединения: $d/n - 2.37$; $d/n - 2.14$; $d/n - 1.91$ (рис. 4).

Последующее повышение температуры вплоть до 600°C не отражалось на дифракционной картине, т.е. фазовый состав остается неизменным (рис. 5).

При нагреве омедненных алюминиевых проводников, обнаружено последовательное формирование новой фазы Al_2Cu . Образование данной фазы, достаточном для идентификации, обнаружено при температуре 300°C и выдержке 45 мин. При этой же температуре и выдержке полностью исчезают дифракционные пики меди (табл. 1).

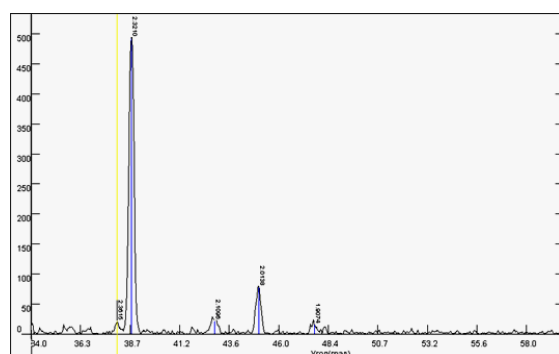


Рисунок 4 – Дифрактограмма образца отожженного при 300°C

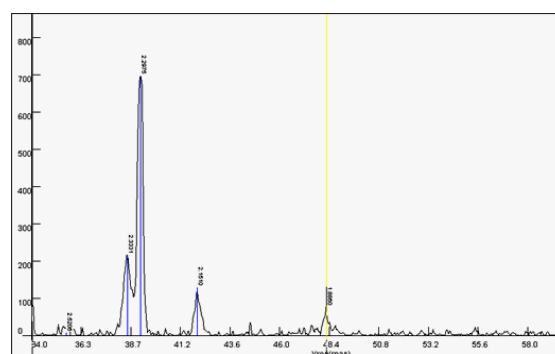


Рисунок 5 – Дифрактограмма образца отожженного при 600°C.

Таблица 1 – Фазы присутствующие в омедненных проводниках при нагреве

Фаза T°C	100			200			300			400			500			600		
время, мин	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
Cu	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Al_2Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Заключение. Как показали данные рентгенофазового исследования, при температурах от 100 до 200°C, проводник не претерпевает каких-либо изменений, на дифрактограммах присутствуют четкие дифракционные максимумы алюминия и меди. При отжиге 300°C на дифрактограммах появляются дифракционные максимумы интерметаллического соединения Al_2Cu . Дифракционные пики меди полностью исчезают при отжиге 400°C.

Таким образом, полученные данные об изменении фазового состава, позволяют определить степень термического воздействия на омедненные алюминиевые проводники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гуров К.П., Карташкин Б.А., Угасте Ю.Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. М.: Наука, 1981. 352 с.
2. A. Gueydan, B. Domengès, P. A. Dubos & E. Hug Thermokinetic analysis of intermetallic growth in copper clad aluminium wires // Materials Research Innovations, Volume 17(2), 2013, P.124-128.
3. Свойства слоистых интерметаллидных композитов системы Cu-Al, полученных по комплексной технологии / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгунов, О. В. Слаутин, С. А. Абраменко // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2004. – № 5. – С. 51–55.
4. Шморгунов В.Г., Кулевич В.П., Савченко В.В. Механизм контактного плавления в системе Al-Cu // Ж. Известия Волгоградского государственного технического университета, № 2 (181), 2016, с. 21-24.
5. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд. – М.: МИСИС, 2002. – 360с.
6. M.R. Toroghinejad, R. Jamaati, J. Dutkiewicz, J.A. Szpunar Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process Mater. Des., 51 (2013), pp. 274-279.
7. H. Zhang, X. Dong Experimental and numerical studies of coupling size effects on material behaviors of polycrystalline metallic foils in microscale plastic deformation Mater. Sci. Eng. A, 658 (2016), pp. 450-462.
8. T. Sasaki, R. Morris, G. Thompson, Y. Syarif, D. Fox Formation of ultra-fine copper grains in copper-clad aluminum wire Scr. Mater., 63 (5) (2010), pp. 488-491
9. K. Rhee, W. Han, H. Park, S. Kim Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics Mater. Sci. Eng. A, 384 (1) (2004), pp. 70-76
10. Y. Guo, G. Qiao, W. Jian, X. Zhi Microstructure and tensile behavior of cu-al multi-layered composites prepared by plasma activated sintering Mater. Sci. Eng. A, 527 (20) (2010), pp. 5234-5240
11. Шморгунов, В.Г. Влияние высокотемпературной термообработки на структуру и механические свойства медно-алюминиевых и титано-стальных СКМ/ В.Г. Шморгунов, Ю.П. Трыков, О.В. Слаутин, Д.Ю. Донцов, С.А. Абраменко // Новые перспективные материалы и технологии их получения. НПИМ-2007: Сб. науч. тр. междунар. конф./ ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2007. – С. 239–240.
12. Трыков, Ю.П. Исследование особенности деформирования при холодной прокатке сваренного взрывом медно-алюминиевого трехслойного СКМ/ Ю.П. Трыков, В.Г.
13. T. Jin, G. Li, Y. Cao, R. Xu, S. Shao, B. Yang Experimental research on applying the copper-clad aluminum tube as connecting tubes of air conditioners Energy Build., 97 (2015), pp. 1-5
14. L. Kuncicka, R. Kocich, K. Dvorak, A. Machackova Rotary swaged laminated cu-al composites: effect of structure on residual stress and mechanical and electric properties Mater. Sci. Eng. A, 742 (2019), pp. 743-750
15. Шморгунов, В.Г. Оптимизация процесса формирования переходной зоны в медноалюминиевом интерметаллидном композите, полученном с помощью комплексной технологии/ В.Г. Шморгунов, Ю.П. Трыков, О.В. Слаутин, С.А. Абраменко // Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПИМ) – 2004: Сб. науч. тр. Междунар. науч. конф./ ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2004. – Т.П. – С. 265–266.
16. Шморгунов, О.В. Слаутин, В.М. Волчков, С.А. Абраменко // Прогрессивные технологии в обучении и производстве: Матер. II Всерос. конф., г. Камышин, 20-23 мая 2003 г. / Камышин. технол. ин-т (филиал) ВолгГТУ и др. – Камышин, 2003. – Т.1. – С. 229-230.
17. Трыков, Ю.П. Механические свойства СКМ системы Cu-Al с рассредоточенными интерметаллидными фрагментами на межслойных границах/ Ю.П. Трыков, В.Г.
18. Шморгунов, С.А. Абраменко, О.В. Слаутин // Инновационные технологии в обучении и производстве: матер. III Всерос. конф., г. Камышин./ КТИ (филиал) ВолгГТУ и др. – Камышин, 2005. – Т.2. – С. 63-64.
19. Шморгунов, В.Г. Механические свойства медно - алюминиевого СИК в интервале температур 20-950 град. / В.Г. Шморгунов, Ю.П. Трыков, С.А. Абраменко // Инновационные технологии в обучении и производстве: матер. III Всерос. конф., г. Камышин/ КТИ (филиал) ВолгГТУ и др. – Камышин, 2005. – Т.2. – С. 74-75.
20. Слаутин, О.В. Механические свойства слоистой интерметаллидной медноалюминиевой композиции при повышенных температурах/ О.В. Слаутин, С.А. Абраменко, В.Г. Шморгунов, Ю.П. Трыков // VIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: Тезисы докладов / ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2004. С. 164-166.

Статья поступила в редакцию 21.01.2022

Статья принята к публикации 10.03.2022