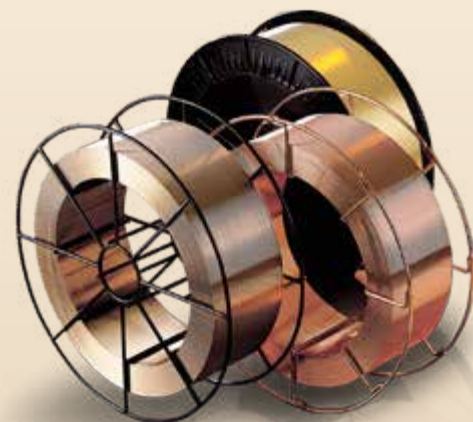


*В.Н. Лебедев, первый заместитель генерального директора по научной работе;
Ю.А. Матвеев, главный конструктор по проводниковым материалам – начальник
отдела проводниковых и изоляционных материалов;
АО «ОКБ КП»*

ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОБЛЕГЧЁННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ МОНТАЖНЫХ И БОРТОВЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ



Аннотация. Приведены основные характеристики и результаты испытаний биметаллической и триметаллической проволоки с сердечником из меди, алюминиевых сплавов с покрытием из серебра, никеля и меди при длительном воздействии повышенной температуры, используемых для токопроводящих жил и экранов облегчённых теплостойких монтажных и бортовых проводов.

На основании результатов испытаний сделаны выводы о перспективности применения биметаллической проволоки на основе алюминиевых сплавов и триметаллической проволоки на основе меди с покрытием из никеля и серебра для бортовой кабельной сети летательных аппаратов.

Ключевые слова: биметаллическая и триметаллическая проволока; механические характеристики проволоки; удельное электрическое сопротивление; глубина диффузионного слоя.

Abstract. The authors present basic characteristics and test results of bimetal and tri-metal wire based on copper and aluminum alloys with silver, nickel and copper coating under long-term exposure to elevated temperatures. This information is important for creation of lightweight and heat-resistant installation and aircraft wires.

Based on the obtained results the authors make a conclusion about the prospective use of bimetal wire of aluminum alloys and tri-metal nickel and silver plated copper wire for onboard wiring.

Key words: bimetal and tri-metal wire; mechanical characteristics of wire; electrical resistivity; diffusion layer depth.

Материал поступил в редакцию 23.10.2019
Лебедев В.Н. E-mail: vladimir.lebedev@okbcp.ru

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ) ставит перед разработчиками объектов и аппаратуры жёсткие требования по улучшению габаритно-массовых характеристик, повышению надёжности и сроков её активного функционирования при эксплуатации.

Ключевыми задачами при создании кабельных изделий для бортовой кабельной сети (БКС) этой техники являются снижение габаритов и массы кабельных изделий, расширение диапазона сечений, обеспечение длительного жизненного цикла и стойкости к внешним воздействующим факторам, включая стойкость к воздействию специальных факторов.

Как показывает зарубежный и отечественный опыт создания конструкций кабельных изделий, поставленная задача решается путём:

– уменьшения массы теплостойких проводниковых материалов, используемых для токопроводящих жил и электрических экранов проводов и кабелей;

– использования изоляционных материалов с низкой плотностью и повышенными физико-механическими и электрическими характеристиками, обладающих хорошими технологическими свойствами при переработке на современном кабельном оборудовании;

– повышения коррозионной стойкости проводниковых материалов при воздействии повышенных температур 170–260 °С в течение 10 000 ч и более, а также при воздействии агрессивных жидкостей и авиационного топлива;

– повышения рабочего напряжения кабельных изделий и БКС.

В большинстве современных конструкций авиационных и монтажных проводов и кабелей металлическая составляющая массы проводниковых материалов существенно больше массы изоляции.

В настоящей статье рассматриваются аспекты улучшения характеристик и снижения массы кабельных изделий за счёт применения облегчённых теплостойких проводниковых материалов, увеличения сроков службы БКС без ухудшения электрических характеристик, без увеличения габаритов и удельной массы проводов и кабелей для авиационной и ракетно-космической техники [1].

ТИПЫ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Традиционными отечественными проводниковыми материалами на рабочую температуру до 200 °С, применяемыми для теплостойких бортовых и монтажных кабельных изделий, являются медная посеребренная проволока марки МСр ТУ17 РСФСР 30-3763–87 и биметаллическая проволока марки БМС ТУ1869-284-0578532–2012.

Мировая практика создания конструкций и производства кабельных изделий свидетельствует о том, что одной из основных тенденций для уменьшения массы проводниковых материалов является замена медной посеребренной проволоки на проволоку из алюминиевых сплавов, имеющую высокие механические и приемлемые электрические свойства. Это в первую очередь отечественные алюминиевые сплавы с добавкой редкоземельных металлов, имеющие электропроводность около 60 % от электропроводности меди. Сплавы этой системы имеют высокие механические свойства вплоть до температуры 350 °С.

Иностранные фирмы используют алюминиевые сплавы системы Al-Fe-Si-Mg, Al-Ni и Al-Zr. При этом возникают технологические проблемы при пайке и заделке проводов в соединители, что ограничивает применение проводов с жилами на основе алюминия и алюминиевых сплавов.

Для обеспечения паяемости и повышения электропроводности токопроводящих жил кабельных изделий в настоящее время рядом зарубежных фирм используется многопроволочная конструкция жилы на основе алюминиевых сплавов с промежуточным слоем меди и серебряным или никелевым покрытием [2].

Например, французская фирма FSP-one серийно производит триметаллическую проволоку на основе алюминия конструкции Al-Cu-Ag и Al-Cu-Ni. Эта проволока используется для изготовления токопроводящих жил бортовых

проводов, длительно работающих при температурах 170–180 °С [3].

Критичным параметром для облегченных кабельных изделий с жилой из алюминиевых сплавов, который может влиять на результат снижения массы БКС, является электрическое сопротивление жил.

В силу того, что при воздействии температуры происходит окисление поверхности проводника и диффузия на границе между алюминием и медью, между медью и серебром, эти процессы приводят к существенному увеличению удельного электрического сопротивления и хрупкости проволоки [4].

Для исследования и оценки характеристик проводниковых материалов в процессе воздействия повышенной температуры 200 °С в атмосферных условиях в качестве объекта для испытаний были выбраны следующие проводниковые материалы:

- триметаллическая проволока марки МНСр (Cu-Ni-Ag) номинальным диаметром 0,12 мм, ТУ1884-009-00304160–17 (патент № 2651801 от 24.06.2017 г.);

- медная посеребренная проволока марки МСр (Cu-Ag) номинальным диаметром 0,12 мм, ТУ17 РСФСР 30-3763–87 (патент № 885365 от 25.03.1980 г.);

- триметаллическая проволока марки ТАС (Al-Cu-Ag) номинальным диаметром 0,12 мм, ТУ117-0714-315–2016 (патент № 2617756 от 28.04.2016 г.);

- биметаллическая проволока марки БМС (Cu-Ag) номинальным диаметром 0,12 мм, ТУ1869-2/84-05785324–2012;

- биметаллическая проволока из алюминиевого сплава 01417 с никелевым покрытием марки АЛН номинальным диаметром 0,5 мм, используемая для изготовления токопроводящих жил бортовых проводов по ТУ16. К76-236–2009 (патент № 23119791 от 20.06.2006 г.);

- триметаллическая проволока (Al-Cu-Ag) номинальным диаметром 0,127 мм производства французской фирмы FSP-one.

Фотографии поперечного сечения образцов триметаллических проволок марок МНСр, ТАС и импортной проволоки приведены на рис. 1–3.

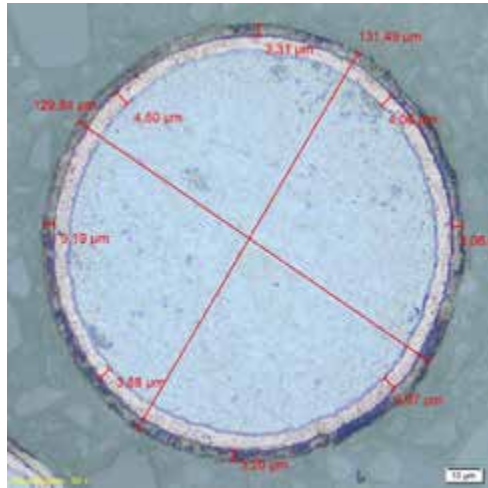


Рис. 1. Триметаллическая проволока Al-Cu-Ag, \varnothing 0,127 мм, производства французской фирмы FSP-one

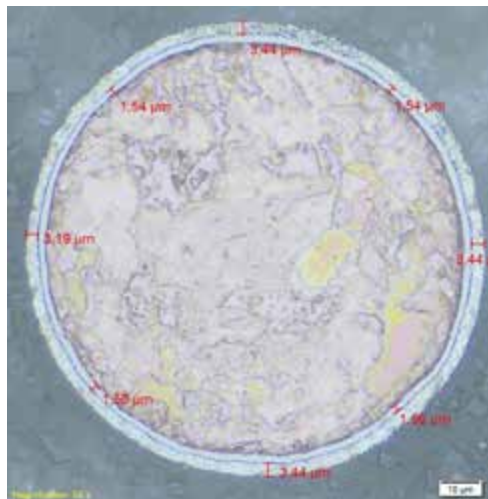


Рис. 2. Триметаллическая проволока Cu-Ni-Ag, \varnothing 0,12 мм, марка МНСр

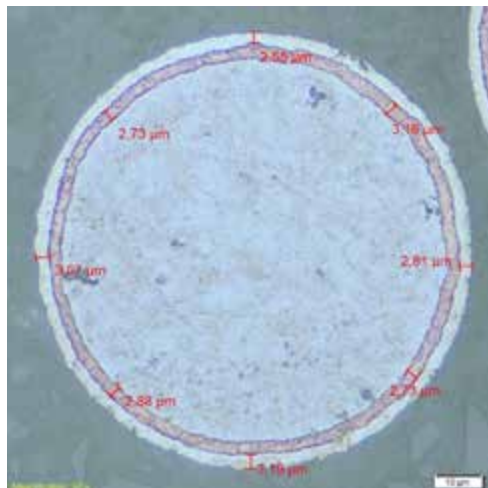


Рис. 3. Триметаллическая проволока Al-Cu-Ag, \varnothing 0,10 мм, марка ТАС

Характеристики исследуемых проводниковых материалов

Характеристика	Марка проволоки					Образцы фирмы FSP-one
	ТАС	АЛН	БМС	МСр	МНСр	
Предел прочности, σ , МПа	187,0	164,9	256	241	279	138
Относительное удлинение, %	7,6	12,0	25,1	25,8	17,0	6,0
Удельное электрическое сопротивление, ρ , Ом·мм ² /м	0,0330	0,0360	0,0180	0,0180	0,0180	0,0268
Масса, кг/км	0,049	0,0381	0,102	0,107	0,103	0,053
Номинальный диаметр, мм	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,127

Основные характеристики проволок указанных марок приведены в таблице.

Как следует из таблицы, масса проволоки с сердечником из алюминиевого сплава меньше массы проволок марок МСр и БМС с сердечником из меди. Вместе с тем масса проволоки марки МНСр находится на уровне массы проволок марок МСр и БМС.

и кабелей, длительно работающих при максимальной температуре 200 °С.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
И УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ 200 °С**

Изменение характеристик биметаллической проволоки марок МСр и БМС, триметаллической проволоки системы Al-Cu-Ag марок ТАС и фирмы FSP-one в зависимости от продолжительности воздействия температуры 200 °С показано на рис. 4–6. Эти изменения являются следствием развития диффузионных процессов на границе раздела металлов и процесса окисления серебряного покрытия.

Как видно из рис. 4–6, предел прочности и удельное электрическое сопротивление биметаллической проволоки марки АЛН и триметаллической проволоки марки МНСр изменяются незначительно. После выдержки образцов проволоки при температуре 200 °С наибольшее изменение наблюдается у относительного удлинения. Установлено, что проволока марок ТАС, МСр, БМС и Al-Cu-Ag (фирмы FSP-one) после воздействия температуры 200 °С в течение 5000 ч стала хрупкой. Это проявилось в существенном снижении значения относительного удлинения.

Свойства же триметаллической проволоки марки МНСр достаточно стабильны, что делает эту проволоку более перспективной для проводов

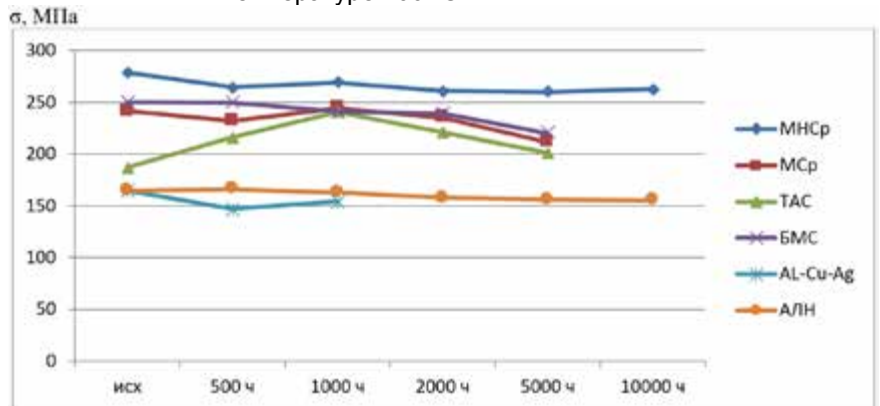


Рис. 4. График изменения предела прочности проволоки различных марок после выдержки при температуре 200 °С

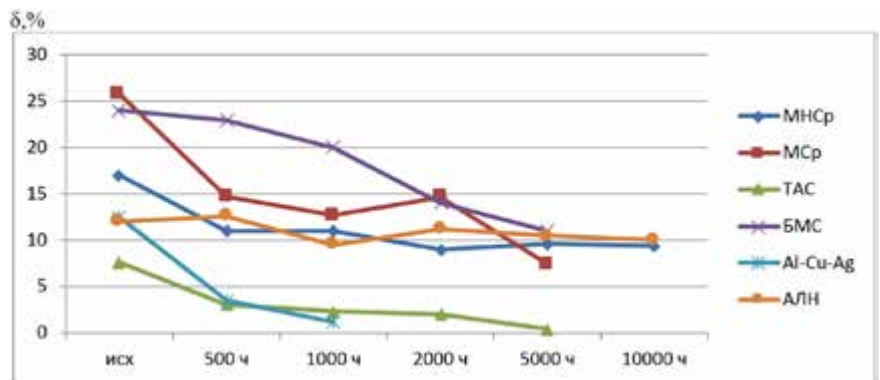


Рис. 5. График изменения относительного удлинения проволоки различных марок после выдержки при температуре 200 °С

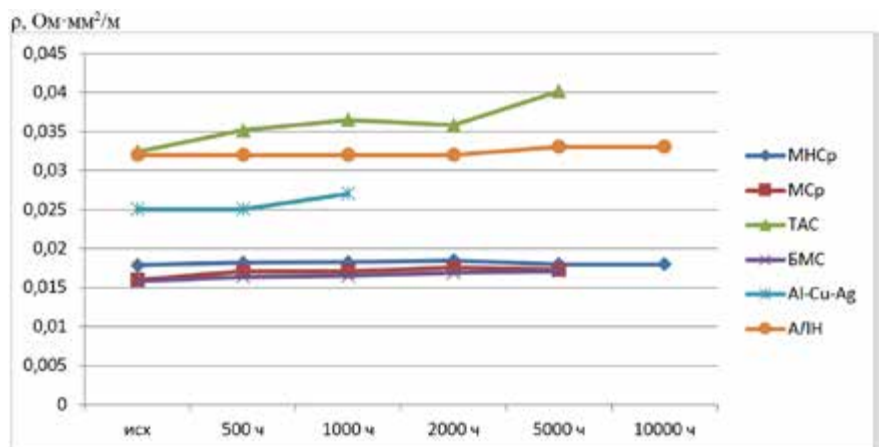


Рис. 6. График изменения удельного электросопротивления проволоки различных марок после выдержки при температуре 200 °С

Увеличение удельного электрического сопротивления проволоки в процессе длительного старения при температуре 200 °С, как уже отмечалось, обусловлено развитием диффузионных процессов на границе раздела материалов проволоки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МАТЕРИАЛОВ ПРОВОЛОК

Для оценки степени развития диффузии в качестве критерия этого процесса при исследовании свойств проволоки использовалась глубина диффузионного слоя на испытуемых образцах. Исследования характера диффузионных процессов производилась на образцах проволоки медной посеребренной и проволоки триметаллической марки ТАС после испытаний проволоки при температуре 200 °С в течение 500 ч и 5000 ч в воздушной среде.

Исследование глубины диффузионного слоя по заданию АО «ОКБ КП» проводились специалистами НИТУ «МИСИС» с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN VEGA 3 LMN и энергодисперсионного детектора X MAX 80.

Результаты оценки глубины диффузионного слоя образцов проволоки приведены на рис. 7–13.

Глубина диффузионного слоя биметаллической проволоки Cu-Ag при температуре 200 °С в течение 500 ч в воздушной среде не превышает 2 мкм (рис. 7 и 8).

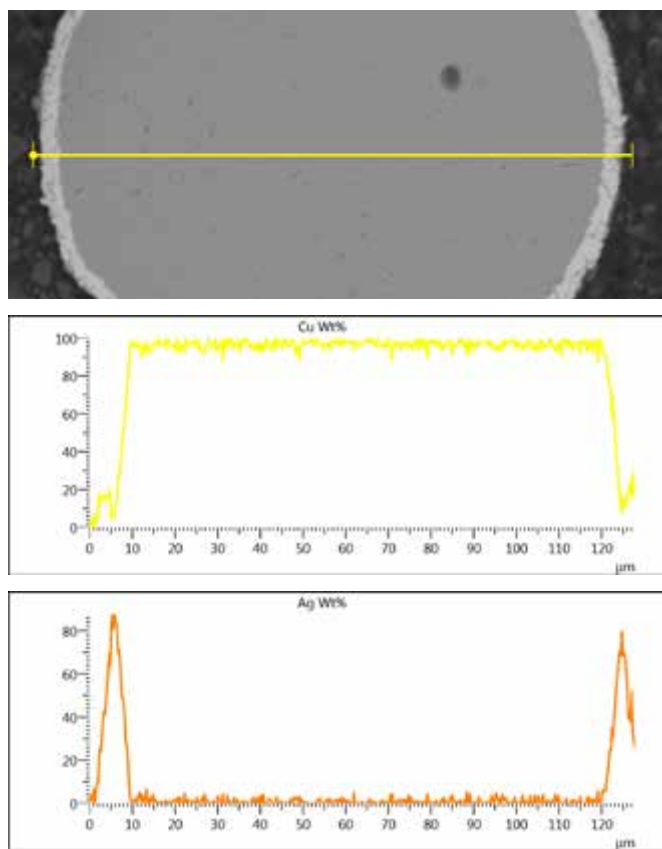


Рис. 7. Общий вид биметаллической проволоки Cu-Ag и концентрационный профиль после отжига при температуре 200 °С в течение 500 ч в атмосферных условиях

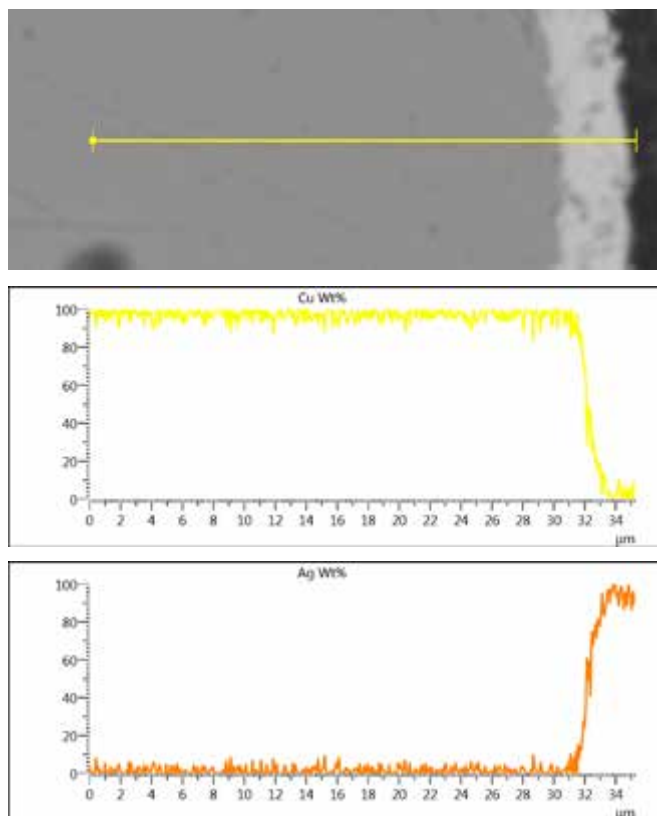


Рис. 8. Частный вид образца биметаллической проволоки Cu-Ag и концентрационный профиль после термической обработки при 200 °С в течение 500 ч в атмосферных условиях

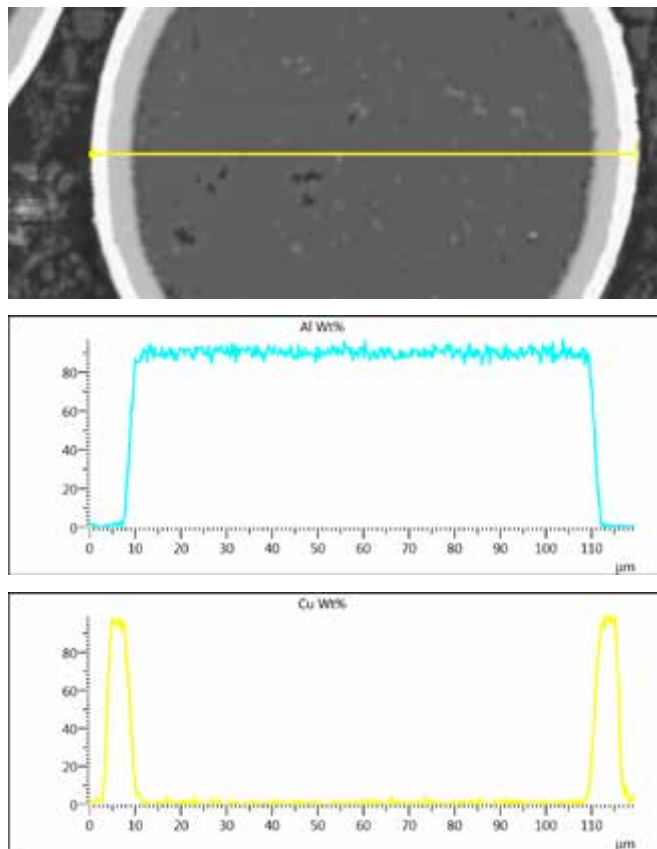


Рис. 9. Общий вид образца триметаллической проволоки Al-Cu-Ag и концентрационный профиль после отжига при температуре 200 °С в течение 500 ч в атмосферных условиях

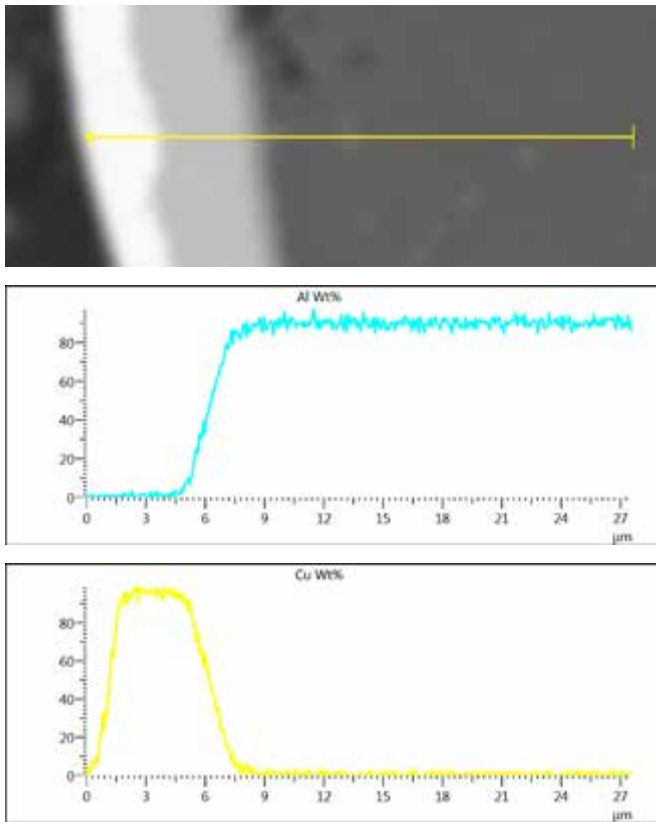


Рис. 10. Частный вид образца триметаллической проволоки Al-Cu-Ag и концентрационный профиль после отжига при температуре 200 °С в течение 500 ч в атмосферных условиях

На образце триметаллической проволоки Al-Cu-Ag после отжига при температуре 200 °С в течение 500 ч глубина диффузионного слоя на границе Al-Cu не превышает 1,5–2 мкм (рис. 9–11). При увеличении продолжительности отжига до 5000 ч глубина диффузионного

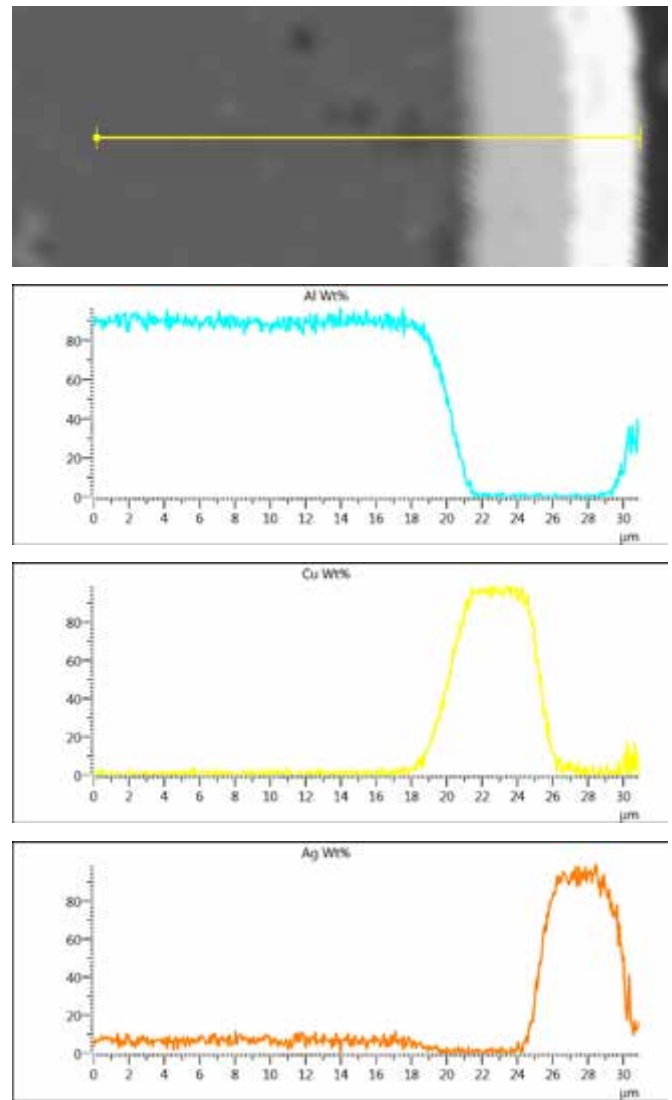


Рис. 11. Частный вид образца триметаллической проволоки Al-Cu-Ag и концентрационный профиль после отжига при температуре 200 °С в течение 500 ч в атмосферных условиях

слоя на границе Al-Cu увеличивается до 4,0 мкм (рис. 12 и 13). При этом на границе Cu-Ag глубина диффузионного слоя, состоящего из твердых растворов этих металлов, составляет 4,0–6,0 мкм.

АО «ОКБ КП» была разработана технология никелирования проволоки из сплава 01417 и конструкция бортовых облегченных проводов марки БК36-448 (ТУ16. К76-236–2009) в диапазоне сечений от 4,0 до 95 мм².

Использование в проволоке марки ТАС сердечника из высокопрочного алюминиевого сплава марки 01417 с удельным сопротивлением не более 0,032 Ом·мм²/м обеспечивает уменьшение обрывности проволоки при изготовлении токопроводящих жил, но приводит к увеличению удельного электрического сопротивления проволоки марки ТАС. В настоящее время АО «ОКБ КП» выполняются работы по разработке триметаллической проволоки с использованием сердечника на основе других алюминиевых сплавов с обеспечением удельного электросопротивления проволоки не более 0,0285–0,0290 Ом·мм²/м. Технологический процесс изготовления триметаллической проволоки марки ТАС



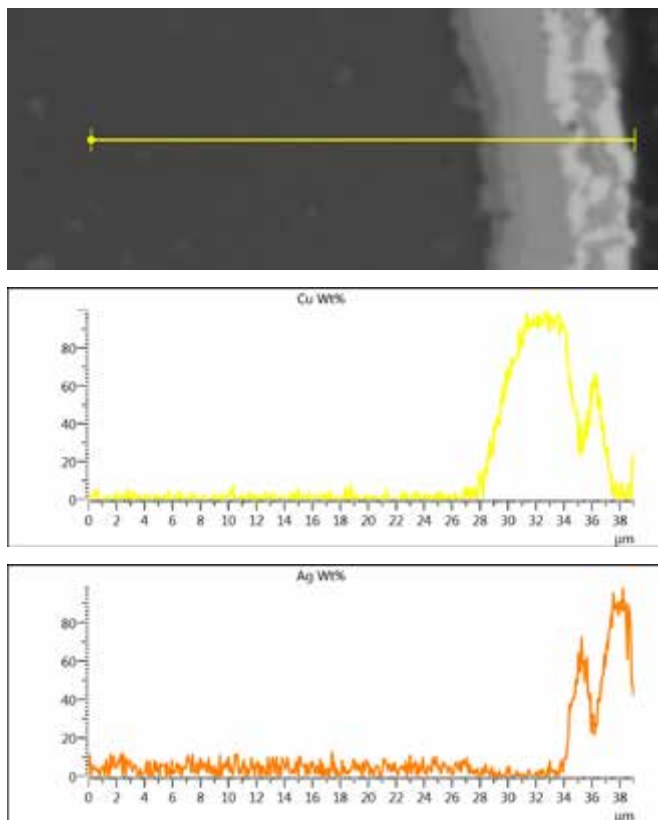


Рис. 12. Частный вид образца триметаллической проволоки Al-Cu-Ag и концентрационный профиль после отжига при температуре 200 °С в течение 5000 ч в атмосферных условиях

с использованием сердечника из алюминия марок А5 и А8 позволяет повысить электропроводность проволоки до значений 0,0267–0,0275 Ом·мм²/м, однако возникают трудности при переработке этой проволоки размером 0,08–0,12 мм, например, при изготовлении токопроводящих жил монтажных проводов из-за её недостаточной механической прочности и повышенной обрывности на технологических операциях.

ВЫВОДЫ

Исходя из полученных результатов исследований, можно сделать следующие выводы:

- улучшение характеристик проводниковых материалов и решение задачи уменьшения массы кабельных изделий связано с использованием триметаллической проволоки ТАС с серебряным покрытием или покрытием из олова, а также с дальнейшим выявлением закономерностей протекания процессов диффузии покрытий проволок при воздействии повышенных температур. Проволока ТАС может быть рекомендована для многопроволочных токопроводящих жил облегчённых монтажных и бортовых проводов на рабочую температуру, не превышающую 170–180 °С, а с покрытием из олова – до 150–155 °С;

- триметаллическая проволока на основе меди марки МНСр имеет высокую коррозионную стойкость и позволяет решать задачи повышения длительной безотказности и минимальных сроков сохраняемости теплостойких проводов и кабелей до 35–40 лет;

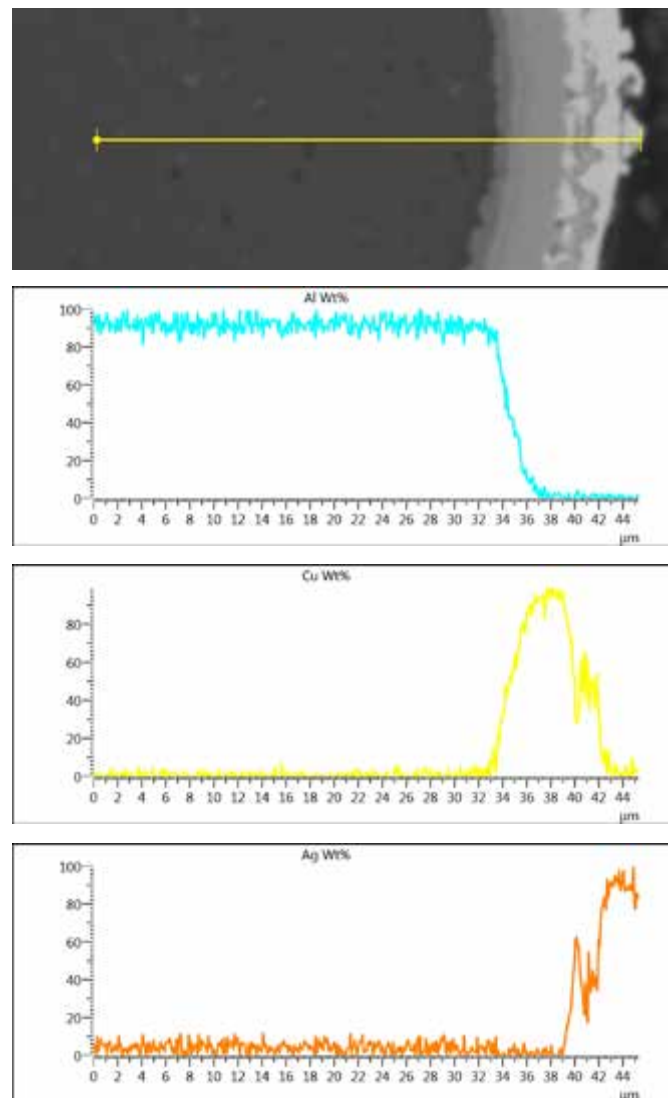


Рис. 13. Частный вид образца триметаллической проволоки Al-Cu-Ag и концентрационный профиль после отжига при температуре 200 °С в течение 5000 ч в атмосферных условиях

- применение облегчённых проводов и кабелей требует разработки отечественных наконечников и технологических инструкций для выполнения электромонтажа;

- необходимо продолжить дальнейшие исследования и разработку технологии изготовления триметаллической проволоки системы Al-Ni-Ag, позволяющей увеличить рабочую температуру использования проволоки до 200 °С, а также разработку алюминиевых сплавов с омическим сопротивлением не более 0,0285–0,0295 Ом·мм²/м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ейльман Л.С. Проводниковые материалы для кабелей и проводов / Л.С. Ейльман, В.И. Королев, В.М. Цесарский – М.: Энергия, 1966. – 145 с.
2. Маковский В.А., Ейльман Л.С. Основы теории и практики производства биметаллических прутков. – М.: Металлургия, 1971. – 191 с.
3. Каталог фирмы FSP-one. – Леон (Франция), 2016. – 13 с.
4. Мастеров В.А., Саксонов Ю.В. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе. – М.: Металлургия, 1979. – 296 с.