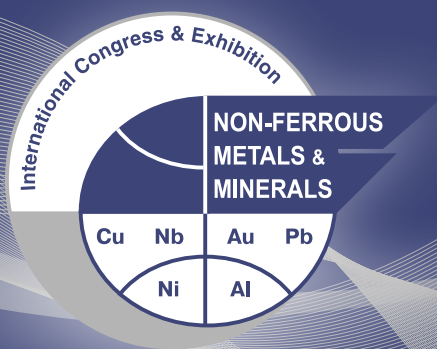


Сборник докладов

одинадцатого международного конгресса

Председатели Оргкомитета Конгресса:
акад. РАН, проф., д.т.н. А.И. Холькин
проф., д.х.н. П.В. Поляков
проф., д.г.-м.н. В.А. Макаров

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И МИНЕРАЛЫ



Krasnoyarsk
Russia

2019

Book of papers

of the eleventh international congress

Congress Organizing Committee Chairmen:
Anatoliy I. Kholkin
Peter V. Polyakov
Vladimir A. Makarov

NON-FERROUS METALS & MINERALS



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-PЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ

*С.Б. Сидельников, В.Н. Тимофеев, Ю.В. Горохов, М.В. Первухин,
Д.С. Ворошилов, М.М. Мотков, А.В. Дурнопьянов, Д.В. Назаренко*

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

A STUDY OF PRODUCTION OF STRAINED SEMIPRODUCTS FOR ELECTRICAL ENGINEERING FROM HIGH ALLOYS OF Al-REM SYSTEM BY COMBINED PROCESSING METHODS

*S.B. Sidelnikov, V.N. Timofeev, Yu.V. Gorokhov, M.V. Pervukhin, D.S. Voroshilov,
M.M. Motkov, A.V. Durnopiyanov, D.V. Nazarenko*

Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

The article presents the results of experimental studies of the production technology of electrical wire made of aluminum alloy of the Al-REM system with content of rare earth metals in the range of 7-9% using continuous casting and extrusion processing methods. Continuous casting rods with a diameter of 12 mm, obtained by casting into an electromagnetic mold (EMM), were the starting material for research. Methods of continuous extrusion "Conform" and combined rolling-extrusion (CRE) were the main methods to obtain a billet for subsequent drawing. Deformation modes, methods of experiments and equipment for the implementation of two variants of the proposed technology using various methods of continuous extrusion described. At all stages of the technology, samples were taken and the mechanical and electrophysical properties of the obtained deformed semi-finished products (ultimate tensile strength, elongation to failure and electrical resistivity) were studied. Application of the "Conform" method in industrial conditions using standard drawing routes allows obtaining a wire of small diameters with high strength properties, however, the plastic properties and values of electrical resistance do not correspond to the existing requirements of the technical specifications for its production. On the contrary, the plastic properties of hot-extruded rods obtained by the CRE method allow cold deformation using only one intermediate annealing. At the same time, the developed technology using continuous casting, combined rolling-extrusion, drawing modes and final annealing of a wire with a diameter of 0.5 mm provides the required level of plastic and strength properties, as well as minimum values of electrical resistance. The developed modes of deformation and heat treatment can be recommended for the industrial production of electrotechnical wire from high-alloyed Al-REM alloys.

Проволока электротехнического назначения из сплавов системы Al-PЗМ широко применяется при изготовлении проводов для летательных аппаратов, работающих при повышенных температурах. При этом они имеют не только высокую термостойкость и малый вес, но и характеризуются повышенными прочностными свойствами [1-9].

Для производства проволоки из таких сплавов применялась многоступенчатая технология, включающая 17 технологических переделов, в том числе литье гранул, дегазацию, спекание гранул, прессование и последующее волочение до заданного размера с промежуточными отжигами. Совмещенные методы, исследуемые в работе (СПП и СЛиПП) значительно сокращают количество переделов.

Наиболее современными технологиями изготовления проволоки из этих сплавов являются литье длинномерных заготовок небольшого диаметра (8-14 мм) в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) и последующая обработка давлением с использованием методов непрерывного прессования до требуемых диаметров (0,1-0,5 мм) [10, 11].

В работе проведены исследования возможности производства проволоки из полученных в электромагнитном кристаллизаторе литых заготовок диаметром 12 мм из сплава системы Al-PЗМ с содержанием PЗМ 7-9%, двумя методами непрерывного прессования: по методу



Конформ [10] и методу совмещенной прокатки-прессования (СПП) [11, 12]. Целью работ было сопоставление свойств длинномерных деформированных полуфабрикатов, изготовленных по разным технологиям непрерывного прессования, для обеспечения при последующем волочении стабильности обработки и исключения обрывности при получении проволоки малых диаметров.

Первый вариант технологии включал следующие переделы:

- получение литой заготовки с помощью ЭМК;
- получение заготовки для волочения на машинах «Конформ»;
- отжиг заготовки в проходной печи;
- волочение заготовки до заданного диаметра проволоки.

Второй вариант технологии, в отличие от первого, предусматривала на втором этапе получение горячепрессованной заготовки для волочения методом СПП.

Непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм из опытного сплава (рис. 1 а) получали в электромагнитном кристаллизаторе на оборудовании ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск) и сматывали в бухты (рис. 1 а). Тонкая проволока, полученная по второму варианту технологии представлена на рис. 1 б.



а



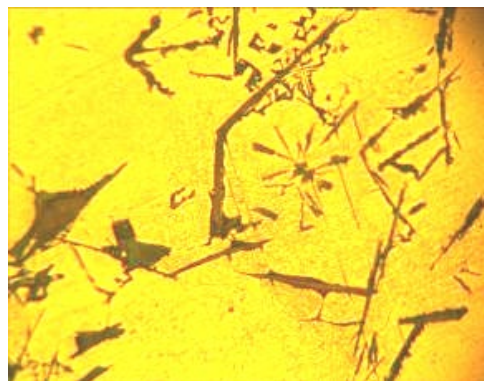
б

Рис. 1. Опытная бухта сплава, отлитая методом ЭМК (а), Тонкая проволока (б)

Анализ микроструктуры отливок из опытного сплава (рис. 2), отлитых в электромагнитный кристаллизатор (рис. 2 а) и обычный кокиль (рис. 2 б), имеет кардинальное различие. В отличие от медленно охлажденной отливки, литой прутки диаметром 12 мм, полученный методом литья в ЭМК, имеет дендритный параметр в 100 раз меньше и однородную тонкую с дисперсными выделениями частиц неравновесных фаз структуру. Металлургических дефектов в виде окисных плен, неметаллических включений в структуре исследуемых образцов из заготовок, отлитых в ЭМК, не обнаружено.



а



б

Рис. 2. Микроструктура литых заготовок, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор (а) и кокиль (б), $\times 200$

Такая структура полученных в ЭМК литых заготовок определяет высокий уровень механических свойств металла при удовлетворительных значениях удельного электрического сопротивления (табл. 1)

Таблица 1

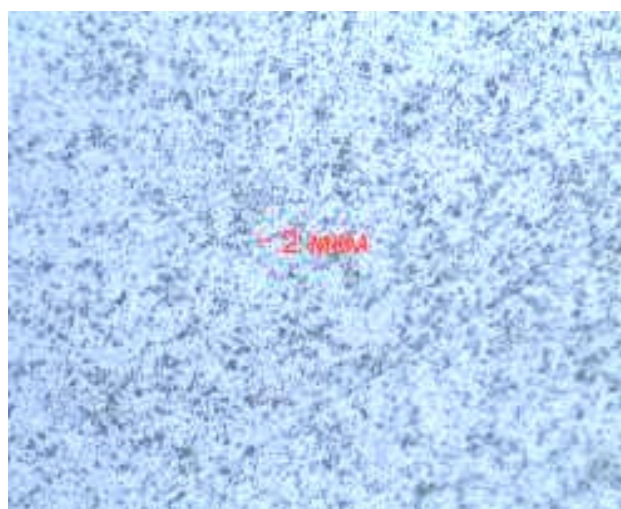
Диаметр образца, мм (усредненный)	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·мм ² /м
11,34	210	7	0,03617
11,54	212	7	0,03620

Для производства прессованного прутка (заготовки под волочение проволоки) из непрерывнолитой заготовки диаметром 12 мм, отлитой методом ЭМК, по первому варианту технологии была использована установка непрерывного прессования Конформ.

Прессование заготовки диаметром 12 мм из опытного сплава на установке Конформ проводили в два канала до диаметра получаемой проволоки 2,65 мм согласно технологическим режимам действующего промышленного предприятия. При этом заправку и запуск установки Конформ производили по стандартной отработанной технологии согласно технологической инструкции. В процессе изготовления замечено что наружный диаметр непрерывнолитой заготовки нестабилен по длине, отклонение от номинального размера изменялось в пределах от 0,5 мм. Температура нагрева заготовки составила $T_3 = 400$ °С при частоте вращения колеса $\omega = 9$ об/мин. При реализации этих технологических режимов были получены опытные партии проволоки

Анализ внешнего вида поверхности полученной проволоки показал, что наряду с ровной и гладкой поверхностью имеются редкие участки с надирами и надрывами, что, по всей видимости, можно объяснить нестабильностью диаметра заготовки по длине.

Микроструктуру образцов проволоки исследовали с помощью оптического микроскопа «Olympus GX51» при увеличении 1000 крат. В результате прессования, как показали микроструктурные исследования (рис. 3), устранена внутрикристаллитная ликвация и обеспечены условия для их последующей холодной деформационной обработки (волочения).


Рис. 3 Микроструктура металла после обработки на установке Конформ, $\times 1000$

Испытания механических свойств на растяжение проводили на универсальной испытательной машине «WDW-20» усилием 20 кН. Анализ механических свойств показывает, что горячая деформация непрерывнолитой заготовки на установке «Конформ» приводит к значительному повышению механических свойств металла. При этом относительное удлинение

увеличивается практически в 2 раза, а временное сопротивление разрыву возрастает в среднем на 10 МПа (табл. 3).

Волочение проволоки до диаметра 0,5 мм методом волочения производили по серийной технологии промышленного предприятия на агрегате HESF 5/3 компании «MAG» (рис. 5). Заправка заготовки диаметром 2,65 мм на агрегате HESF 5/3 проводили методом протяжки по стандартному маршруту волочения с единичным обжатию порядка 20%, на выходе происходила намотка на цилиндрическую катушку с применением технологической смазки L71-03.

Изготовление проволоки осуществляли по технологии волочения со скольжением в поликристаллических волокнах с применением СОЖ UNOPOL AL 570. Волочение производилось непрерывно, без промежуточного отжига, при этом во время работы зафиксировано два обрыва при волочении. Далее проволока проходила термообработку в камере печи агрегата длиной шесть метров. Количество проходов проволоки через печь в процессе проведения работ изменялось от 4 до 10, скорость в диапазоне $v = 26-104$ м/мин, а температура камеры печи $T_{отж} = 400-470$ °С. Таким образом, управляя параметрами агрегата, количеством проходов проволоки через печь и температурой в камере печи, подбирали режим термической обработки проволоки. В результате экспериментальных исследований получены 3 бухты проволоки диаметром 0,5 мм общим весом 48,3 кг. Свойства проволоки, прошедшей обработку по трем режимам, приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Диаметр, мм	Режим обработки	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·мм ² /м
Прессование на установке Конформ				
2,65	$T_3 = 400$ °С, $\omega = 9$ об/мин, 2 канала	214	15	0,03183
2,65	$T_3 = 400$ °С, $\omega = 9$ об/мин, 2 канала	221	15	0,03226
2,65	$T_3 = 400$ °С, $\omega = 9$ об/мин, 2 канала	221	14	0,03218
Волочение на агрегате HESF 5/3 и отжиг				
0,50	$T_o = 470$ °С, $v = 26$ м/мин,	263	1,6	0,03413
0,50	$T_o = 450$ °С, $v = 80$ м/мин,	233	1,7	0,03420
0,50	$T_o = 450$ °С, $v = 104$ м/мин,	195	2,0	0,03399
Требуемые свойства проволоки				
0,50	после отжига	Не менее 142	Не менее 8	Не более 0,0320

Анализируя уровень полученных свойств проволоки, можно сделать вывод что опытно-промышленные испытания по первому варианту технологии не позволили получить требуемые пластические свойства (относительное удлинение не менее 8%) и характеристики электросопротивления (не более 0,0320 Ом·мм²/м), что связано со структурными особенностями сплава и его упрочнением при применении стандартных промышленных маршрутов волочения.

В связи с этим провели экспериментальные исследования по второму варианту технологии с применением метода совмещенной прокатки-прессования [10] и получали заготовки для волочения по следующей методике. В электрической камерной печи одновременно нагревали несколько заготовок до температуры 550 °С со временем выдержки 10-15 мин. При этом



с помощью специально разработанной печи осуществлялся, нагрев валков до 100 °С. При достижении заданной температуры заготовок в печи, валки установки СПП-200 приводились во вращение с частотой 4 об/мин, и задавали их в калибр валков. Металл осаживался по высоте при прокатке, распрессовывался перед матрицей и выдавливался с вытяжкой, равной 10, через нее в виде прутка диаметром 5 мм.

Далее из полученного методом СПП прутка диаметром 5 мм изготавливали проволоку диаметром 0,5 мм волочением на цепном стане однократного действия с промежуточным отжигом. На последнем этапе исследований с целью достижения заданных свойств проволоки, полученные образцы были подвергнуты отжигу при температурах 350, 400, 450 и 500 °С и времени выдержки 1 час (нагрев с печью, охлаждение на воздухе).

На каждом этапе технологии определяли механические свойства прутков и проволоки методом статических испытаний на растяжение образцов при комнатной температуре на универсальных испытательных машинах Walter+Bai AG LFM 400 kN и LFM 20 kN («Walter + Bai AG», Швейцария), а удельное электрическое сопротивление ρ измеряли на образцах длиной 1 м с помощью омметра «Виток». Полученные значения механических свойств и удельного электросопротивления при 20 °С для прутков и проволоки из опытного сплава по второму варианту технологии представлены в табл. 3.

Таблица 3

Диаметр полуфабриката, мм и состояние	Степень деформации ε , %	Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Удельное электросопротивление ρ , Ом·мм ² /м
СПП, T=550 °С, 4 об/мин				
5 мм, горячедеформированное	Вытяжка 10	174	27,9	0,03023
Волочение				
4,5 мм, холоднодеформированное	19	204	17,0	0,03075
3,6 мм, холоднодеформированное	48,16	215	6,1	0,03095
3,0 мм, холоднодеформированное	64	222	5,3	0,03105
2,5 мм, холоднодеформированное	75,4	231	4,6	0,03162
Промежуточный отжиг при температуре 500 °С и времени выдержки 1 час				
2,5, отожженное	-	135	28,6	0,02987
1,8 мм, холоднодеформированное	47,3	159	23,4	0,03067
1,6 мм, холоднодеформированное	58,4	223	3,8	0,03092
1,0 мм, холоднодеформированное	83,7	235	1,4	0,03110
0,5 мм, холоднодеформированное	95,9	250	1,3	0,03183
Окончательный отжиг при температурах 350, 400, 450, 500 °С и времени выдержки 1 час				
0,5 мм, отожженное, 350 °С, 1 ч	-	152	13	0,02924
0,5 мм, отожженное, 400 °С, 1 ч	-	144	14,3	0,02931
0,5 мм, отожженное, 450 °С, 1 ч	-	142	12,9	0,02923
0,5 мм, отожженное, 500 °С, 1 ч	-	142	16,3	0,02914
Требуемые свойства проволоки диаметром 0,5 мм				
0,5 мм, отожженное	-	Не менее 142	Не менее 8	Не более 0,0320

Анализ данных табл. 4 позволяет утверждать, что у проволоки, полученной по второму варианту технологии, все режимы отжига обеспечивают требуемый уровень свойств, но наибольшей пластичностью (16,3 %) обладает проволока, отожженная при температуре 500 °С с временем выдержки 1 час. Для этой же проволоки получены минимальные значения электросопротивления (0,02914 Ом·мм²/м).

Заключение

Таким образом, исследования, проведенные по оценке влияния режимов деформационной и термической обработки на механические и электрофизические свойства проволоки электротехнического назначения из высоколегированного алюминиевого сплава с содержанием 7-9 % РЗМ, позволили сделать следующие выводы:

- предложена и экспериментально опробована новая технология изготовления проволоки электротехнического назначения малых диаметров (до 0,5 мм) из сплавов системы Al-РЗМ с применением непрерывных методов обработки металла;
- использование в этой технологии метода непрерывного литья с применением электромагнитного кристаллизатора, методов непрерывного прессования Конформ и СПП, а также холодного волочения позволяет получать проволоку малых диаметров в производственных условиях;
- при использовании методов непрерывного прессования целесообразно использовать полученную в ЭМК непрерывнолитую заготовку диаметром 12 мм, имеющую однородную по сечению и длине структуру и высокую пластичность;
- сравнительный анализ применения различных методов непрерывного прессования при реализации разработанной технологии показал, что проволока, полученная с использованием метода совмещенной прокатки-прессования, имеет требуемый уровень механических и электрических свойств, оговоренных в имеющихся технических условиях на ее производство.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и ООО «Научно-производственный центр Магнитной гидродинамики» в рамках научного проекта № 18-48-242021 «Разработка фундаментальных основ получения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из высоколегированных сплавов системы Al-РЗМ с применением методов совмещенной обработки и исследование их реологических свойств», а также в соответствии с договором Министерства образования и науки России №13.G25.31.0083 по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки».

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов Ю.А. Роль и перспективы редкоземельных металлов в развитии физико-механических характеристик и областей применения деформируемых алюминиевых сплавов. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2015. Т. 8. № 5. 636–645.
2. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий. *Кабели и Провода*, 2012. №1. 8-15.
3. Liao H., Wu Y., Wang Y. Microstructure Evolution of Al-0.35%Si-0.2%Mg-0.3%Ce Alloy During Hot Extrusion and Its Contributions to Performances. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. No. 24(6). 2503–2510.
4. Liao H., Liu Y., Lü C., Wang Q. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys. *Journal of Materials Research*. 2017. No. 32(3). 566–574.
5. Shi Z.M., Gao K., Shi Y.T., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al–Fe binary alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. No. 632. 62–71.
6. Meng Zh., Haoyu W., Wei H., Milin Zh., Yunna L., Yanli W., Yun X., Fuqiu M., Xingmei Zh. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al–Ce alloy from CeO₂ assisted by AlCl₃ in LiCl–KCl melts. *Sci China Chem*. 2014. No. 57(11). 1477–1482.
7. Судавцова В.С., Шевченко М.А., Березуцкий В.В., Иванов М.И., Матейко И.В., Кудин В.Г. Термодинамические свойства и фазовые равновесия в сплавах двойных систем Al(Si)–Ce. *Журнал физической химии*. 2014. Том 88. № 5. 736–746.



8. Mogucheva A., Zybkin D., Kaibyshev R. Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al-Ce alloy. *Materials Science Forum*. 2012. Vol. 706-709, 361–366.
9. Belov N.A., Alabin A.N., Teleuova A.R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. Vol. 53, Iss. 9–10. 455–459.
10. Горохов Ю.В., Шеркунов В.Г., Довженко Н.Н. и др. *Основы проектирования процессов непрерывного прессования*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 224 с.
11. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. *Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов*. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
12. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Дроздова Т.Н. и др. Исследование структуры и оценка свойств литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ с различным содержанием никеля. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2013. №.1. 45-48.