

Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016, 9(6), 872-879

~ ~ ~

УДК 669.71

Study of Influence of Alloying Elements on Strength and Thermal Resistance of Electric Engineering Aluminum Alloys

**Viktor A. Bergardt^{*a,b},
Tatyana N. Drozdova^{a,b}, Tamara A. Orelkina^a,
Vladimir P. Zhereb^a and Olga V. Yakiviyuk^a**

^a*Siberian Federal University*

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

^b*«RUSAL ETC» LLC*

37/1 Pogranichnikov Str., Krasnoyarsk, 660111, Russia

Received 18.02.2016, received in revised form 24.03.2016, accepted 15.07.2016

In the article a comparison analysis of Zr, Fe and rare-earth metals (REM) influence on the structure and properties of deformable semi-finished products from aluminium alloys was investigated. It was established that to achieve properties of wire rod, demanded by ASTM B941–05, the less Zr content is needed in compare with REM. High temperature experiments of Al-Zr-Fe u Al-REM alloys were performed to find more perspective alloying elements for the heat resistant wire production.

Keywords: wire rod, aluminium alloys, ASTM B941–05 standard, specific electric resistance, high temperature strength, heat resistant wire.

Citation: Bergardt V.A., Drozdova T.N., Orelkina T.A., Zhereb V.P., Fedorova O.V. Study of influence of alloying elements on strength and thermal resistance of electric engineering aluminum alloys, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(6), 872-879. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-6-872-879.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: berngardt19@mail.ru

Исследование влияния легирующих элементов на прочность и термостойкость алюминиевых сплавов электротехнического назначения

**В.А. Бернгардт^{а,б}, Т.Н. Дроздова^{а,б},
Т.А. Орелкина^а, В.П. Жереб^а, О.В. Федорова^а**

*^аСибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, Свободный, 79*

*^бООО «РУСАЛ ИТЦ»
Россия, 660111, Красноярск, Пограничников, 37/1*

В статье проведен сравнительный анализ влияния циркония, железа и РЗМ на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Установлено, что для достижения свойств катанки, заданных в ASTM B941–05, требуется на порядок меньше циркония по сравнению с РЗМ. Проведены высокотемпературные испытания сплавов Al-Zr-Fe и Al-РЗМ для поиска наиболее перспективных легирующих элементов для производства термостойких проводов.

Ключевые слова: катанка, алюминиевые сплавы, требования ASTM B941–05, удельное электрическое сопротивление, жаропрочность, термостойкие провода.

Введение

Электротехническая промышленность в современных условиях ориентирована на использование электропроводных материалов, которые сохраняют высокую прочность при эксплуатационных нагревах. Для решения этой задачи наиболее перспективным направлением является создание низколегированных алюминиевых сплавов с добавкой циркония. Выбор циркония обусловлен его способностью значительно увеличивать температурный порог рекристаллизации, что и позволяет проводам работать при повышенных температурах.

Другим решением проблемы повышения жаропрочности алюминиевых сплавов служит легирование их редкоземельными металлами (РЗМ). Редкоземельные металлы, такие как Се и La, относятся к группе малорастворимых элементов, которые образуют с алюминием промежуточные фазы, обычно кристаллизующиеся в составе эвтектик. Эти фазы, как правило, тугоплавкие, а эвтектические температуры близки к температуре плавления алюминия, что положительно влияет на показатели жаропрочности.

Целью данной работы стало исследование влияния циркония, железа и РЗМ на структуру и свойства алюминиевой катанки электротехнического назначения.

Методика эксперимента

Объектом исследования была катанка из сплавов Al–(0,20–0,36) %Zr–(0,20–0,28) %Fe и Al–0,5–3,5 %РЗМ. Катанку диаметром 9 мм из сплавов Al–Zr–Fe изготавливали на литейно-прокатном агрегате (ЛПА) с последующей сортовой прокаткой. Катанку из сплавов Al–РЗМ, где РЗМ – Се+La, получали по технологии совмещенного литья и прокатки-прессования

(СЛИПП). Цирконий и РЗМ вводили в алюминий для повышения термостойкости, а железо – для увеличения прочностных свойств деформированных полуфабрикатов. В конечном итоге физико-механические свойства катанки должны удовлетворять требованиям стандарта ASTM B941–05.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) катанки измеряли с помощью омметра «ВИТОК» в соответствии с ГОСТ 7229–76. Испытание на растяжение катанки и проволоки проводили на универсальной машине Walter+Bai AG LFM 400 kN.

Исследование микроструктуры сплавов осуществляли на микроскопе CarlZeiss Axio Observer Alm. Зеренную структуру образцов изучали после анодного оксидирования. Анодную пленку на образцах получали с помощью автоматической полировально-травильной установки ATM Kristall 620.

Исследование структуры и свойств катанки сплавов системы Al-Zr-Fe и Al-РЗМ

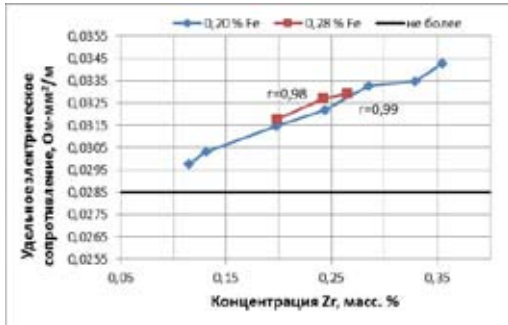
На первом этапе работы был проведен анализ зависимости удельного электрического сопротивления от концентрации циркония, железа и РЗМ в алюминиевых сплавах. Установлено, что с повышением концентрации циркония и РЗМ удельное электрическое сопротивление растет и наблюдается прямолинейная зависимость (рис. 1а, б). УЭС катанки из сплавов Al–(0,20–0,36) % Zr–(0,20–0,28) % Fe не соответствует требованиям ASTM B941–05 и имеет значения 0,03147–0,03428 Ом·мм²/м. (табл. 1). Временное сопротивление разрыву данных сплавов находится в пределах 126–144 МПа (рис. 2а). Увеличение концентрации железа с 0,20 до 0,28 % при одинаковом содержании циркония приводит к незначительному повышению уровня УЭС и росту временного сопротивления разрыву (рис. 2а). Повышение концентрации циркония в интервале 0,20–0,36 % обеспечивает повышение предела прочности на 12 %. Относительное удлинение соответствует 7–12 % (рис. 3а).

Анализ механических свойств сплавов Al–(0,5–3,5) % РЗМ показал, что для катанки исследуемых составов прочностные свойства находятся в пределах 119–162 МПа (рис. 2б), относительное удлинение – 20–27 % (рис. 3б). Повышение концентрации РЗМ в исследуемом диапазоне дает прирост прочностных характеристик на 30 %, пропорционально повышению предела прочности в сплавах снижаются пластические характеристики (табл. 3). Удельное

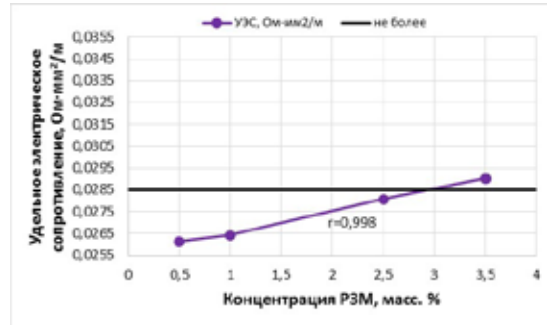
Таблица 1. Свойства катанки из сплавов системы Al–Zr–Fe

Zr, масс. %, %	Fe, масс. %, %	σ_B , МПа	δ , %	ρ_{20} , Ом·мм ² /м
0,20	0,20	126	10	0,03147
0,20	0,28	144	12	0,03180
0,27	0,28	143	7	0,03296
0,29	0,20	140	8	0,03327
0,33	0,20	141	9	0,03349
0,36	0,20	140	9	0,03428
Требования ASTM B941–05		120	8	0,0285

электрическое сопротивление катанки из сплавов Al-(0,5-3,5) %PЗМ составляет 0,02614-0,02902 Ом · мм²/м, что соответствует требованиям ASTM B941-05, за исключением сплава Al-3,5 %PЗМ.

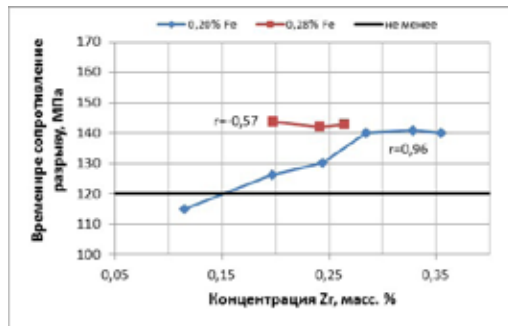


а

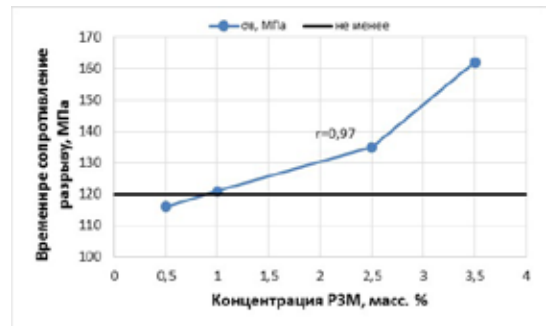


б

Рис. 1. Зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации легирующих элементов сплавов: а – Al-Zr-Fe; б – Al-PЗМ

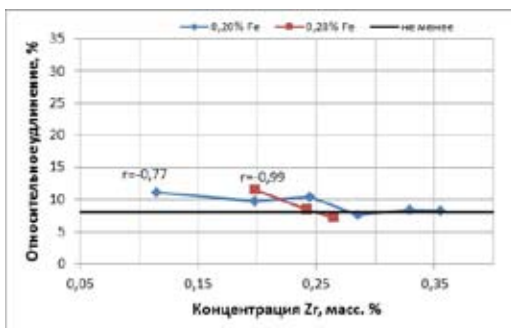


а

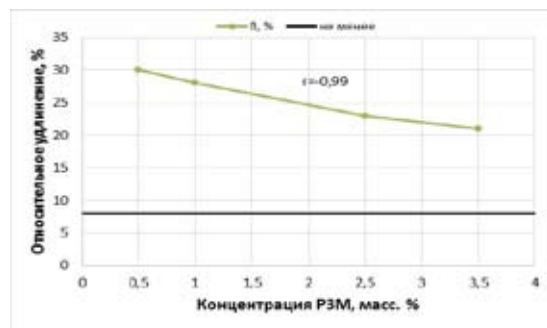


б

Рис. 2. Зависимость временного сопротивления разрыва от концентрации легирующих элементов сплавов: а – Al-Zr-Fe; б – Al-PЗМ



а



б

Рис. 3. Зависимость относительного удлинения от концентрации легирующих элементов сплавов: а – Al-Zr-Fe; б – Al-PЗМ

Микроструктура образцов катанки в поперечном сечении состоит из зерен пересыщенного цирконием α -твердого раствора на основе алюминия и мелких железосодержащих частиц избыточных фаз, расположенных по границам дендритных ячеек и ориентированных в направлении прокатки; часть включений образует строчечность (рис. 4а, в). Повышение концентрации циркония в сплавах приводит к уменьшению размера зерна (рис. 4з), повышение концентрации железа – к увеличению объемной доли железосодержащих фаз (рис. 4в).

Микроструктура исследуемых прутков, изготовленных СЛИПП, представлена зернами α -твердого и макронеоднородностью в виде строчечного расположения эвтектических колоний (α +Al₄Me), имеющих пластинчатое строение (рис. 5). Увеличение концентрации легирующих элементов усиливает неоднородность в структуре прутков и приводит к росту объемной доли эвтектики. Значительное легирование сплавов, до 3,5 % РЗМ, приводит к грубой строчечной структуре по всему объему прутка (рис. 5з).

Достижение требований ASTM B941–05 по удельному электрическому сопротивлению в катанке из малолегированных цирконием алюминиевых сплавов возможно после воздействия термической обработки. Известно положительное влияние на понижение удельного электрического сопротивления гетерогенизирующего отжига Al–Zr сплавов, основным процессом которого является снижение концентрации легирующих элементов в твердом растворе за счет его распада с выделением дисперсных частиц метастабильной фазы Al₃Zr [1–4].

Одинарный отжиг по исследуемым режимам в работах [1, 3, 4] не обеспечил необходимый уровень УЭС. Было показано, что для снижения УЭС катанки при одноступенчатом отжиге необходимо использовать длительные выдержки. В ранее проведенных работах [1, 3] для повышения производительности процесса термической обработки и более существенного сниже-

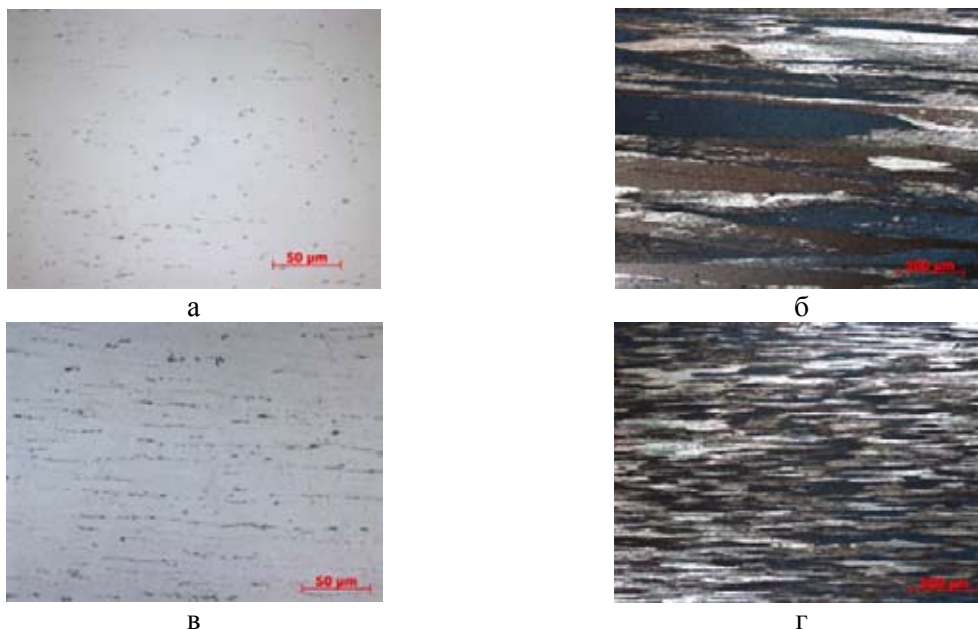


Рис. 4. Микроструктура катанки сплавов: а, б – Al-0,27 %Zr-0,20 %Fe; в – Al-0,27 %Zr-0,28 %Fe, г – Al-0,33 %Zr-0,20 %Fe; а, в – в светлом поле, $\times 500$; б, г – в поляризованном свете, $\times 50$

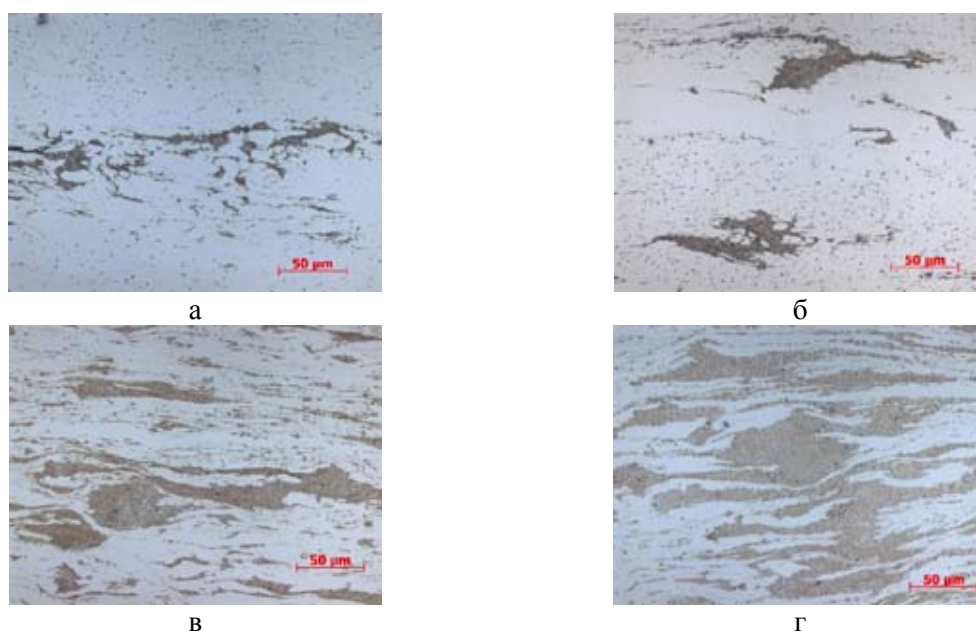


Рис. 5. Микроструктура прутков, полученных СЛИПП, из сплавов Al-PЗМ, $\times 500$: а – Al-0,5 % PЗМ; б – Al-1,0 % PЗМ; в – Al-2,5 % PЗМ; г – Al-3,5 % PЗМ

Таблица 2. Режимы отжига и свойства катанки сплава Al-0,27Zr-0,28Fe

Отжиг	Режим отжига	ρ_{20} , Ом·мм ² /м	σ_b , МПа	δ , %
Одинарный	350 °С, 48 ч	0,03024	135	19
Ступенчатый	350 °С, 48 ч + вторая ступень	0,02803	134	23
Одинарный	400 °С, 12 ч	0,02959	127	23
Ступенчатый	400 °С, 12 ч + вторая ступень	0,02790	127	25
Требования ASTM B941-05		0,0285	120	8

ния УЭС катанки из малолегированных сплавов системы Al-Zr рекомендовано использовать ступенчатый отжиг.

После проведения ступенчатого гетерогенизирующего отжига УЭС катанки сплавов Al-Zr-Fe составляет 0,02790-0,02803 Ом · мм²/м, прочность – 127-134 МПа, пластичность 23-25 %. Измеренные значения временного сопротивления разрыву и удельного электрического сопротивления катанки, отожженной по режимам двухступенчатого отжига, удовлетворяют требованиям международного стандарта ASTM B 941-05 (табл. 2). После проведения ступенчатого отжига сплавы с цирконием по УЭС и прочности сопоставимы со сплавом Al-2,5 %PЗМ.

Исследование термостойкости сплавов Al-Zr-Fe и Al-PЗМ

Для определения термостойкости катанки проводили высокотемпературные испытания на растяжение. Испытание на растяжение при повышенной температуре (150 °С) сплавов

Таблица 3. Свойства катанки из сплавов системы Al-PЗМ при комнатной и повышенной температурах испытания

Сплав	Испытания при $t_{ком}$			Испытания при $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	σ_b , МПа	δ , %	УЭС, Ом·мм ² /м	σ_b , МПа	K_n , %*
Al-0,5 %PЗМ	119	27	0,02614	119	100
Al-1,0 %PЗМ	129	24	0,02643	118	92
Al-2,5 %PЗМ	147	22	0,02807	119	81
Al-3,5 %PЗМ	172	20	0,02902	139	81

* K_n , % – остаточный коэффициент напряжения при нагреве.

Таблица 4. Свойства катанки при комнатной и повышенной температурах испытания

Сплав	После отжига (испытания при $t_{ком}$)			Испытания при $t = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	σ_b , МПа	δ , %	УЭС, Ом·мм ² /м	σ_b , МПа	K_n , %*
Al-0,27 %Zr-0,28 %Fe	136	26	0,0284	124	91

* K_n , % – остаточный коэффициент напряжения при нагреве.

Al-(0,5-3,5) % PЗМ показало, что снижение предела прочности катанки происходит не более чем на 20 % от первоначально измеренных значений (табл. 3), а при испытании катанки из сплава Al-0,27 %Zr-0,28 % Fe при температуре 230 °C предел прочности снизился всего на 10 % (табл. 4).

Выводы

Сравнительный анализ деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения позволил установить, что введение 0,5–2,5%-ных дорогостоящих PЗМ в алюминий незначительно увеличивает УЭС, значения которого соответствуют требованиям ASTM B941–05. Легирование алюминиевых сплавов цирконием в количестве 0,20–0,36 % Zr, что на порядок ниже, чем PЗМ, значительно повышает УЭС, которое существенно превышает требуемые значения стандарта. Для снижения удельного электрического сопротивления катанки, легированной цирконием, до требований ASTM B941–05 необходимо проводить гетерогенизирующий отжиг.

Повышение концентрации PЗМ в алюминии с 0,5 до 3,5 % увеличивает значения временного сопротивления разрыву на 30 %. В сплавах Al-Zr-Fe повышение концентрации Zr с 0,20 до 0,36 % приводит к росту предела прочности катанки на 12 %. При этом относительное удлинение катанки, легированной PЗМ, в 2 раза выше.

Высокотемпературные испытания показали, что сплав Al-0,27 %Zr-0,28 %Fe сохраняет на 90 % предел прочности при температуре 230 °C, а сплавы, легированные PЗМ в количестве 1,0-3,5 %, сохраняют прочностные свойства на 80-90 % только при температуре 150 °C. Следовательно, легирование алюминия цирконием на порядок меньшей концентрацией, чем PЗМ, обеспечивает более высокую жаропрочность сплавам.

Анализ влияния легирующих элементов на свойства катанки из электротехнических алюминиевых сплавов показал, что цирконий является наиболее перспективным легирующим элементом для производства термостойких проводов.

Список литературы

[1] Бернгардт В.А., Дроздова Т.Н., Орелкина Т.А., Сидельников С.Б., Трифоненков Л.П., Фролов В.Ф., Сальников А.В., Федорова О.В. Разработка режимов отжига катанки из сплавов системы Al-Zr для достижения заданного комплекса свойств. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2014, 7(5), 587-595 [Bergardt V.A., Drozdova T.A., Orelkina T.A., Sidelnikov S.B., Trifonenkov L.P., Frolov V.F., Salnikov A.V., Fedorova O.V. Development of annealing conditions wire rod alloy of Al-Zr system to reach required properties. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2014, 7(5), 587-595 (in Russian)]

[2] Белов Н.А., Истомин-Кастровский В.В., Алабин А.Н. Влияние циркония на структуру и механические свойства малолегируемых сплавов системы Al-Fe-Si. *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*, 2003, 4, 54-59 [Belov N.A., Istomin-Kastrovskiy V.V., Alabin A.N. Zirconium influence on structure and mechanical properties of low doped alloys of Al-Fe-Si system. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2003, 4, 54-59 (in Russian)]

[3] Бернгардт В.А., Федорова О.В. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства катанки из сплавов системы Al-Zr. *Молодежь и наука: IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием*, 2013; <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-006.pdf> [Bergardt V.A., Fedorova O.V. Investigation of influence of heat treatment conditions on structure and properties of alloys Al-Zr system, *Molodezh i nauka: IX Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem*, 2013; <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-006.pdf> (in Russian)]

[4] Белов Н.А., Алабин А.Н., Прохоров А.Ю. Влияние отжига на электросопротивление и механические свойства холоднодеформированного сплава Al-0,6 % (мас.) Zr. *Цветные металлы*, 2009, 10, 65-68 [Belov N.A., Alabin A.N., Prokhorov A.Yu. Annealing influence on resistivity and mechanical properties of cold deformed alloy Al-0,6 % (mas.) Zr. *Tsvetnye metally*, 2009, 10, 65-68 (In Russian)]