

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И
ПАРАМЕТРОВ ЛИТЬЯ НА СВОЙСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Федорова О. В., Беспалов В. М., Бернгардт В. А., Дроздова Т. Н.,
научный руководитель д-р. техн. наук Довженко Н. Н.
Сибирский Федеральный Университет**

Современная энергетическая промышленность нацелена на использование электропроводных материалов, которые при высоких электропроводных свойствах сохраняют высокую прочность в процессе эксплуатационных нагревов. Применение высокотемпературных проводов, изготовленных из термостойких алюминиевых сплавов с добавками циркония, позволяет с минимальными затратами решать проблему увеличения пропускной способности линий электропередачи, а также повысить надежность и экономическую эффективность работы электрических сетей. Цирконий значительно повышает температуру рекристаллизации алюминия, что обеспечивает работоспособность проводов до температуры 310 °С.

Катанку диаметром 9 мм из сплавов системы Al–Zr изготавливали непрерывным литьем заготовки на колесо литейно-прокатного агрегата (ЛПА) и последующей сортовой прокатки на многоклетьевом прокатном стане, а также получали совмещенной прокаткой-прессованием (СПП). В процессе холодного волочения из катанки изготавливали проволоку различного диаметра. Деформированные полуфабрикаты изготавливали из низколегированных сплавов Al–(0,10–0,35)%Zr–(0,15–0,30)%Fe.

Удельное электрическое сопротивление катанки, далее по тексту (УЭС), и проволоки измеряли с помощью омметра «ВИТОК» на расчетной длине 1 м, в соответствии с ГОСТ 7229–76. Испытание на растяжение катанки и проволоки проводили на машине Walter+Bai AG LFM 400 kN. Катанка должна удовлетворять требованиям международного стандарта ASTM B941–05, а проволока – IEC 62004–07. По стандарту ASTM B941–05 удельное электрическое сопротивление (УЭС) катанки не должно превышать 0,0285 Ом·мм²/м, временное сопротивление составлять не менее 120 МПа, относительное удлинение – не менее 8 %.

На первом этапе работы проводили анализ влияния циркония и железа на механические свойства и удельное электрическое сопротивление катанки. Было установлено, что исследуемая катанка, изготовленная из сплавов Al–(0,10–0,35)%Zr–(0,15–0,30)%Fe не соответствует требованиям ASTM B941–05 по значениям удельного электрического сопротивления, рис. 1, а. Кроме того, катанка с низким содержанием циркония до 0,13 % Zr не удовлетворяет по временному сопротивлению разрыву, рис. 1, б.

На рисунке 1 приведены зависимости свойств катанки от концентрации циркония и железа в алюминиевом сплаве. Анализ зависимостей позволил выявить, что с повышением концентрации циркония УЭС растет, наблюдается линейная зависимость, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции $r=0,989-0,994$, которые характеризуют степень линейной зависимости между величинами. Коэффициент корреляции, близкий к 1 свидетельствует о функциональной связи между концентрацией циркония в сплаве и УЭС. Такое закономерное повышение удельного электрического сопротивления с ростом концентрации циркония подтверждает, что он растворяется в алюминии. Увеличение концентрации железа с 0,20 до 0,28 масс.% в сплавах приводит к незначительному повышению уровня УЭС.

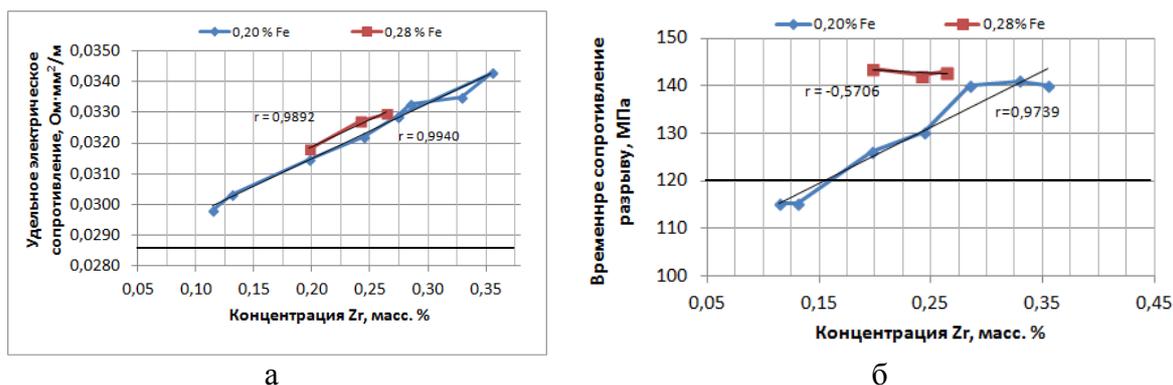


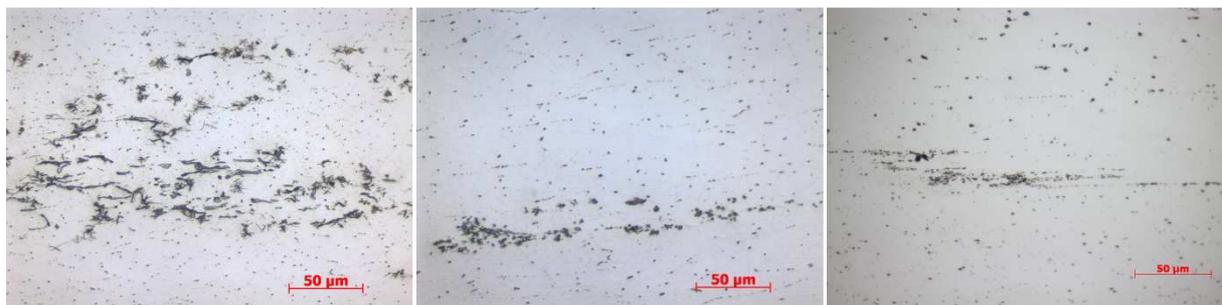
Рисунок 1– Зависимость УЭС (а) и временного сопротивления разрыву (б) катанки от концентрации циркония и железа в сплаве

С увеличением концентрации железа в сплавах от 0,20 до 0,28 масс.% повышается уровень временного сопротивления разрыву (рис. 1, б). В сплавах с 0,2 % Fe увеличение циркония от 0,13 до 0,28 масс.% приводит к повышению временного сопротивления разрыву, дальнейшее увеличение циркония до 0,36 масс.% не приводит к изменению прочностных свойств. В сплавах с 0,28 масс.% Fe концентрация циркония от 0,20 до 0,27 масс.% не влияет на величину временного сопротивления разрыву катанки. Повышенное содержание железа в сплаве, нивелирует влияние концентрации циркония в исследуемом диапазоне на прочностные свойства катанки (рис. 1, б).

На втором этапе работы исследовали влияние температуры плавки и заливки расплава на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов из сплавов Al–(0,30–0,35)%Zr–(0,15–0,20)%Fe. Литые заготовки осуществляли при температуре плавки 800 и 900 °С и температуре литья – 740, 800 и 900 °С. Исследовали литые заготовки, катанку, полученную СПП и проволоку после холодного волочения с разным коэффициентом вытяжки.

Цирконий способен образовывать пересыщенный твердый раствор при литье, однако температура приготовления расплава должна быть существенно выше по сравнению с обычной технологией. Литые исследуемых сплавов должно обеспечить полное растворение циркония в твердом растворе [8].

Металлографический анализ литых образцов позволил установить, что при температуре плавки 900 °С цирконий полностью растворяется в твердом растворе. Понижение температуры до 800 °С приводит к тому, что не весь цирконий входит в состав твердого раствора, в микроструктуре образцов обнаружены в большом количестве первичные кристаллы фазы Al₃Zr в виде ограненных кристаллов игольчатой и пластинчатой формы, расположенные по границам зерен и дендритных ячеек. Наличие фазы Al₃Zr свидетельствует о недостаточно высокой температуре плавки и неэффективном легировании цирконием твердого раствора. Литая структура наследуется катанкой и проволокой, однако в долевом сечении деформированных полуфабрикатов наблюдается ориентированность частиц железосодержащих фаз и включений Al₃Zr в направлении оси деформации (рисунок 2, а). Скопления интерметаллидных частиц Al₃Zr при деформации приводят к расслоениям в катанке и проволоке. В проволоке, изготовленной из прутков после СПП, расслоений не обнаружено. Волочение проволоки приводит к измельчению включений Al₃Zr и вытягиванию их в строчки (рисунок 2, б, в).



а–пруток Ø 9 мм

б– проволока Ø 4,5 мм

в– проволока Ø 4,5 мм

Рисунок 2-Микроструктура деформированных полуфабрикатов, полученных из заготовки, отлитой при температуре 800 °С, ×500: а, б –сплав Al–0,3%Zr–0,2%Fe; в –сплав Al–0,35%Zr–0,2%Fe

Предел прочности катанки из сплавов Al–(0,30–0,35)%Zr–0,2%Fe составляет 135–148 МПа, проволоки 180–252 МПа, относительное удлинение катанки 15–25 %, проволоки 2–17 %. Температура плавки и заливки в исследуемом интервале не оказывает существенного влияния на механические свойства катанки. УЭС катанки соответствует значениям 0,03143–0,03343 Ом·мм²/м, проволоки 0,03137–0,03387 Ом·мм²/м. С увеличением температуры плавки с 800 до 900 °С удельное электросопротивление возрастает.

При температуре плавки 800 °С в микроструктуре литых заготовок и катанки обнаружены первичные кристаллы Al₃Zr. Выделение первичных кристаллов Al₃Zr свидетельствует о том, что введенный цирконий не полностью растворяется в твердом растворе. Уменьшение содержания циркония в твердом растворе, по сравнению с исходной концентрацией в сплавах, обеспечивает снижение уровня УЭС. При температуре плавки 900 °С цирконий полностью растворяется в твердом растворе, образуя максимально пересыщенный твердый раствор, что приводит к высоким значениям УЭС катанки.

Достижение требований ASTM B941–05 по УЭС в катанке из малолегируемых цирконием алюминиевых сплавов возможно после воздействия термической обработки. Гетерогенизирующий отжиг сплавов уменьшает концентрацию легирующих элементов в твердом растворе и, соответственно, снижает удельное электрическое сопротивление. Известно положительное влияние на понижение удельного электрического сопротивления при отжиге Al–Zr сплавов, основным процессом которого является распад пересыщенного цирконием твердого раствора с выделением наноразмерных частиц метастабильной фазы Al₃Zr [1–7]. Ступенчатый отжиг катанки из сплавов Al–0,30%Zr–0,2%Fe, рекомендованный в работах [3–7], позволил получить комплекс заданных свойств по УЭС, однако предел прочности на 10 МПа ниже требуемого уровня. Проволока, изготовленная из такой катанки, обеспечивает требуемый уровень механических и электрических свойств, заявленный в ИЕС 62004–07.

Таблица 1 – Исходные свойства катанки и проволоки из сплава Al–0,3%Zr–0,2%Fe

Свойства катанки						Диаметр проволоки, мм	Свойства проволоки в деформированном состоянии	
в деформированном состоянии			в отожженном состоянии				ρ ₂₀ , Ом·мм ² /м	σ _B , МПа
σ _B , МПа	δ, %	ρ ₂₀ , Ом·мм ² /м	σ _B , МПа	δ, %	ρ ₂₀ , Ом·мм ² /м			
138,67	23,50	0,03266	110	33	0,02819	4,3	0,02839	161
						3,6	0,02839	165
						2,0	0,02867	179

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследование закономерностей изменения механических и электрических свойств катанки от содержания циркония и железа в сплавах системы Al–Zr–Fe позволило выявить диапазон концентраций, в котором катанка будет иметь максимальные прочностные свойства. Запас прочности необходим для проведения термической обработки с целью снижения удельного электрического сопротивления.

2. Установлено, что при температуре плавки 900 °С цирконий полностью растворяется в твердом растворе, образуя максимально пересыщенный твердый раствор, снижение температуры плавки до 800 °С приводит к нежелательному выделению первичных кристаллов фазы Al₃Zr.

3. Проволока из сплава Al–0,3%Zr–0,2%Fe, изготовленная из отожженной катанки, удовлетворяет требованиям международного стандарта ИЕС 62004–07 по уровню УЭС и механическим свойствам.

Список использованных источников:

1. Падалка В.А., Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Биронт В.С. // Литейщик России. 2011. Вып. 5. С. 33.

2. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Трифоненков Л.П., Баранов В.Н., Лопатина Е.С., Довженко И.Н., Беспалов В.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. Вып. 1. С. 51.

3. Бернгардт В.А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства катанки из сплавов системы Al–Zr [электронный ресурс] Федорова О.В. // Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-006.pdf>

4. Федорова О.В. Исследование влияния видов и режимов обработки на свойства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения [Текст] / Бернгардт В.А., Беспалов В.М. // Сборник докладов XIII Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых.–2012– с. 268-270.

5. Бернгардт В.А. Влияния режимов термической обработки на структуру и свойства проволоки из сплавов системы Al–Zr [Текст] / Федорова О.В., Беспалов В.М. // Сборник докладов XIII Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых.–2012– с. 326-328.

6. Бернгардт В.А. Разработка термической обработки катанки из малолегированных сплавов системы Al–Zr [Текст] / Бернгардт В.А. // Сборник докладов XIV Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых.–2013– с. 247-249

7. Дроздова Т.Н. Термическая обработка сплавов системы Al–Zr для достижения заданного комплекса свойств катанки электротехнического назначения [Текст] / Бернгардт В.А., Орелкина Т.А., Трифоненков Л.П. // V Международный конгресс Цветные металлы. – 2013. – с. 544 – 548.

8. Федорова О.В. Исследование технологии изготовления проволоки электротехнического назначения с повышенными эксплуатационными свойствами [Текст] / Бернгардт В.А., Беспалов В.М. Сборник докладов XIV Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых.–2013– с. 250-252.