

**ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА ТЕРМОСТОЙКОГО ПРОВОДНИКОВОГО  
АЛЮМИНИЕВО-ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА С ПОВЫШЕННЫМ  
СОДЕРЖАНИЕМ Fe и Si**

**Белов Н.А., Короткова Н.О.**

*НИТУ «МИСус, Москва, Россия, nikolay-belov@yandex.ru*

В связи с постоянным ростом потребления электроэнергии, связанным с увеличением доли применения автоматического оборудования и электронных устройств, в том числе в бытовых условиях, имеется потребность в увеличении пропускной способности воздушных линий электропередач (далее ВЛ). На данный момент для повышения пропускной способности ВЛ используются низколегированные алюминиевые сплавы с добавкой циркония [1,2], которые обладают более высокой термической стабильностью, чем традиционные марки проводниковых алюминиевых сплавов (А5Е, 8076, АВЕ, 6201 и др.). Назначение добавки циркония (0,2–0,4 масс.%) состоит в том, чтобы сформировать в конечной структуре наночастицы фазы  $Al_3Zr$  ( $L_{12}$ ), которые позволяют резко повысить температуру рекристаллизации [3]. При этом концентрация циркония в алюминиевом твердом растворе (далее (Al)) должна быть минимальной (это относится и ко всем другим элементам, которые входят в состав проводниковых сплавов), что достигается за счет оптимизации режима деформационно-термической обработки (далее ДТО). Следует отметить, что проводниковые сплавы имеют существенные ограничения по примесям, что не позволяет использовать для их производства вторичное сырье, за исключением лома и отходов по ГОСТ Р 54564-2011 групп А1, А2, А3, А4 (в виде строительных профилей и конструкций из сплавов 6063 и 6061). А поскольку вторичное сырье позволяет существенно снизить себестоимость готовой продукции, то изучение возможностей его использования для проводниковых Al-Zr сплавов представляется весьма актуальным. Ключевым вопросом при решении этой задачи является научное обоснование связывания примесей (в частности, Fe и Si) в фазы с благоприятной (не игольчатой) морфологией и минимизация их концентраций в (Al). Другой проблемой применительно к проводниковым сплавам является повышение их прочностных свойств при сохранении достаточной удельной электропроводности (УЭП). Для решения этой задачи целесообразно рассмотреть более сложные системы легирования, что требует анализа соответствующих фазовых диаграмм.

В данной работе расчетным и экспериментальным путем проведен количественный анализ фазового состава сплавов системы Al-Zr-Fe-Si, что позволило выявить концентрации, при которых достигается минимальная легированность (Al). Анализ политермического разреза, рассчитанного при 1% Fe и 0,3% Zr (рис.1а), показывает, что полное связывание железа в фазу  $Al_8Fe_2Si$ , обладающей наилучшей морфологией среди железистых фаз, реализуется при 0,2-0,5% Si.

Для экспериментального изучения результатов расчетного моделирования фазового состава было выбрано 20 модельных сплавов, содержащих постоянную концентрацию железа (1%) и переменные концентрации кремния (до 1%) и циркония (до 0,7%). На примере модельных сплавов этой четверной установлена зависимости УЭП от концентраций Si и Zr при разных режимах ДТО. Обнаружено положительное влияние кремния в количестве 0,2-0,3 мас. % на сочетание УЭП и твердости Al-Zr сплавов после термической обработки в интервале 400-450 °С. Это позволило обосновать технологические режимы литья и ДТО сплавов системы Al-Fe-Si-Zr, позволяющие изготавливать деформированные полуфабрикаты прокаткой и волочением со структурой, содержащей алюминиевую матрицу с содержанием кремния до 0,1 мас. % и равномерно распределенными частицами фазы  $Al_8Fe_2Si$  со средним поперечным размером не более 1 мкм.

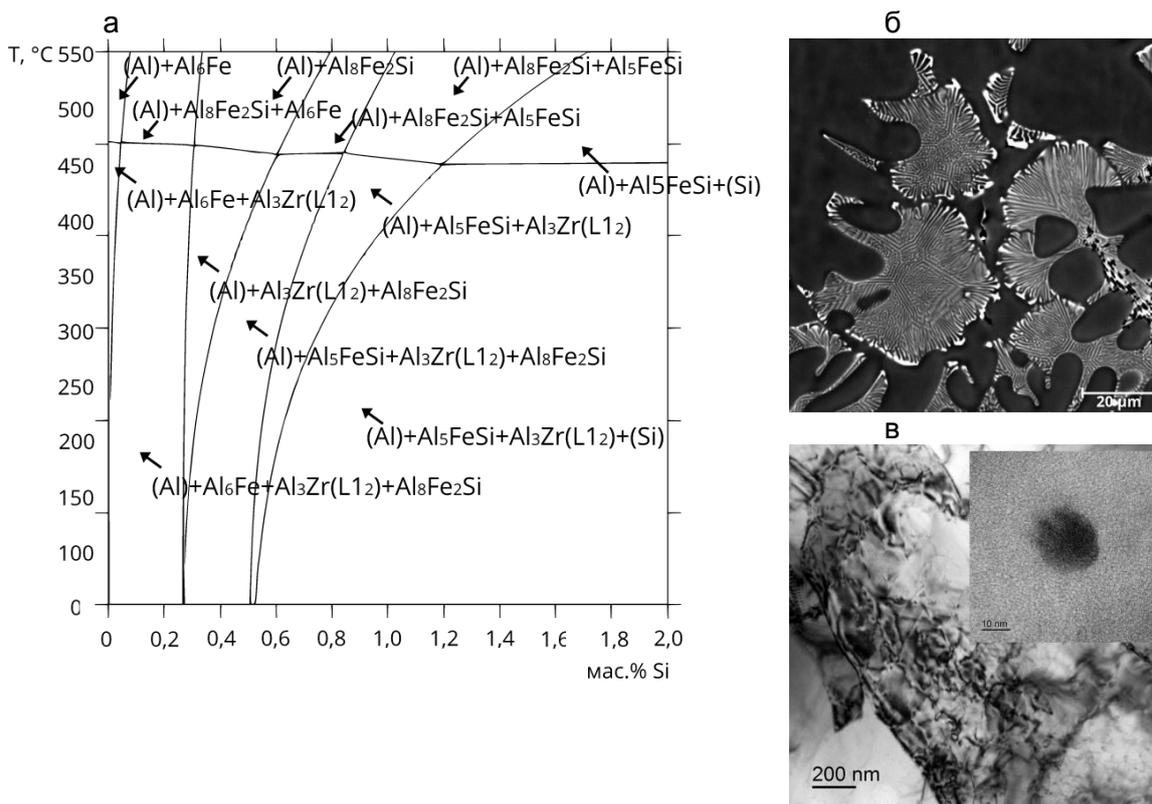


Рисунок 1- Фрагмент политермического сечения системы Al-Fe-Si-Zr при 1% Fe и 0,3%Zr (а), структура литого сплава Al-1%Fe-0,5%Si-0,3%Zr (б) и наночастицы  $Al_3Zr$  в горячекатаном листе этого сплава (б)

По результатам измерений УЭП и твердости, полученных на модельных сплавах, для более детального анализа были выбраны и получены экспериментальные образцы четырех сплавов системы Al-Fe-Si-Zr, химический состав которых приведен в табл.1. В лабораторном технологическом эксперименте участвовали образцы в трех последовательных состояниях – литом, после горячей деформации и после холодной деформации. Все три состояния моделировали каждое в отдельности: литую заготовку трапецеидального сечения, катанку и проволоку. Целью эксперимента являлось моделирование производственного процесса получения проволоки в лабораторных условиях и изучение влияния температурного и деформационного параметров на физико-механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов.

Таблица 1- Химический состав отобранных экспериментальных сплавов Al-Fe-Si-Zr

№ п/п	Обозначение	Концентрация элемента, мас.%			
		Zr	Si	Fe	Al
1	103000	0,28	0,11	0,87	Основа
2	103025	0,18	0,28	1,06	
3	103050	0,18	0,52	1,05	
4	103100	0,37	1,11	1,13	

Проведенное экспериментальное исследование физико-механических свойств сплавов, приведенных в табл.1, показало, что добавка Zr около 0,2 мас.% в присутствии 0,3 мас. % Si позволяет достичь эффекта упрочнения сопоставимого со сплавом, легированным 0,3 мас.% Zr, при этом потеря прочности при нагреве до 300°C в течение 1 часа составляет менее 10%. Также методом МРСА выявлено, что при введении 0,3 мас.% Si его содержание в (Al) составляет менее 0,1 мас. %. Добавка около 0,5 мас. % Si приводит к большей легированности (Al), что приводит к снижению

УЭП. По совокупности полученных данных в сплавах с повышенным содержанием Fe в оптимальная концентрация кремния составляет 0,2-0,3 масс.%, По результатам ПЭМ в структуре горячекатаного образца, имитирующего катанку, выявлены частицы фазы  $Al_3Zr$  модификации  $L1_2$  в состоянии отжига при температуре 400 °С в течение 1 часа (рис.1в,г).

По результатам проведенных экспериментальных исследований был выбран и приготовлен сплав следующего состава: Al-1%Fe-0,3%Zr-0,25%Si (АЖ0,3ЦК). При выборе данного состава и режима ДТО исходили из того, чтобы полностью связать железо и кремний в фазу  $Al_8Fe_2Si$  которая обладает благоприятной морфологией, (рис.1б), а цирконий – в наночастицы фазы  $L1_2$  (рис.1в). Из сплава АЖ0,3ЦК был получен слиток диаметром 60 мм, а из него методом радиально-сдвиговой прокатки – пруток диаметром 9 мм, что соответствует типичному диаметра катанки, используемой на кабельных заводах. Из данного прутка была получена проволока, диаметром 1 мм, свойства которой приведены в табл.2.

Таблица 2 - Свойства проводниковых сплавов АЖ0,3ЦК и (проволока)

Сплав	УЭП		Механические свойства <sup>1</sup>		
	МСм/мм	IACS	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
АЖ0,3ЦК	32,3	56	179	162	6
Al-0,3%Zr	34,2	58	172	150	6

<sup>1</sup>после нагрева при 300°С в течение 1 часа

С учетом того, что доля фазы  $Al_8Fe_2Si$  в сплаве АЖ0,3ЦК составляет около 4 об.%, то значение УЭП близко к максимально возможному уровню. По механическим свойствам и термостойкости сплав АЖ0,3ЦК не уступает алюминиево-циркониевым сплавам, приготовленных на первичном алюминии. Таким образом, показана принципиальная возможность создания термостойких алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа и кремния, что позволяет использовать для их производства достаточно большую долю вторичного сырья.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р МЭК 62004-2014. Проволока из термостойкого алюминиевого сплава для провода воздушной линии электропередачи. М.: Стандартинформ, 2015.
2. T. Knych, M. Piwowarska, P. Uliasz. Studies on the process of heat treatment of conductive AlZr alloys obtained in various productive processes. Archives of metallurgy and materials. - 2011. - Vol. 56.- P. 685-692.
3. N. A. Belov, A. N. Alabin, I. A. Matveeva, D. G. Eskin Effect of Zr additions and annealing temperature on electrical conductivity and hardness of hot rolled Al sheets. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2015. -No 25. - P. 2817-2826.
4. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2010.