

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Zr НА СООТВЕТСТВИЕ ТИПАМ ТЕРМОСТОЙКОСТИ АТ1–АТ4

Бернгардт В.А., Дроздова Т.Н.

научный руководитель д–р техн. наук Жереб В.П.

Сибирский Федеральный университет

В последнее время крупные города России сталкиваются с проблемой ограниченной пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП). Развитие электротехнической промышленности в современных условиях ориентировано на использование термостойких материалов.

Повышение пропускной способности ЛЭП диктует более жесткие требования производителям полуфабрикатов для электротехнических кабелей и проводов, которые должны иметь высокую прочность при эксплуатационных нагревах и соответствовать МЭК 62004–09. Поэтому для производителей катанки и проволоки в условиях повышающихся требований к электропроводным материалам наиболее остро встала проблема создания новых сплавов.

Перспективными термически стабильными сплавами с высокой электропроводностью и прочностью до температуры 310 °С являются малолегируемые цирконием алюминиевые сплавы. Выбор циркония обусловлен его способностью резко повышать температурный порог рекристаллизации, что и позволяет проводам работать при повышенных температурах, тогда как технически чистый алюминий марок А5Е и А7Е сильно разупрочняется. Стабильность структуры Al–Zr сплавов при воздействии температуры, т.е. термостойкость, определяется, в частности, малым коэффициентом диффузии циркония в алюминии и устойчивостью дисперсных частиц интерметаллидов.

В лабораторных условиях СФУ проводили испытания на термостойкость проволоки, изготовленной из отожженной катанки сплавов Al–0,33Zr–0,20Fe и Al–0,36Zr–0,20Fe. Для этого катанку волочили до диаметров проволоки 4,5; 4; 3,6 и 2 мм. Испытания на термостойкость проводили в соответствии с МЭК 62004–09. Термостойкость проволоки из исследуемых сплавов оценивали по изменению временного сопротивления разрыву при комнатной температуре после нагрева до температур 230, 280 и 400 °С и выдержке в течение часа. Остаточный коэффициент напряжения при растяжении, измеренный при комнатной температуре после нагрева провода до выше приведенных температур не должен быть менее 90 % в сравнении с первоначально измеренным значением перед нагревом. Требования значений термостойкости и механических свойств проволоки различных диаметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Требования значений термостойкости проволоки из термостойкого алюминиевого сплава

Тип	$T_n, ^\circ\text{C}^*$	$T_{\text{экс}} (^\circ\text{C}),$ не менее	$T_{\text{доп.экс}} (^\circ\text{C}),$ не менее	$\rho_{20}, \text{нОм}\cdot\text{м}$ (IACS, %), не более	$\sigma_b, \text{МПа},$ не менее	$\delta, \%$ не менее
АТ1	230	150	180	28,735(60,0 %)	159–169	1,5–2,0
АТ2	230	150	180	31,347(55,0 %)	225–248	1,5–2,0
АТ3	280	210	240	28,735(60,0 %)	159–176	1,5–2,0
АТ4	400	230	310	29,726(58,0 %)	159–169	1,5–2,0

* T_n –температура нагрева при испытании, °С; τ –длительность нагрева при испытании, ч; $T_{\text{экс.}}$ –допустимая непрерывно действующая температура эксплуатации 40 лет (°С), не менее; $T_{\text{доп. экс.}}$ –допустимая

температура эксплуатации в течение 400 ч (°C), не менее; ρ_{20} – удельное сопротивление при 20 °C (нОм·м), (проводимость, в соответствии с IACS), не более.

Анализ механических свойств показал, что в проволоке диаметром 4–4,5 мм прочностные свойства находятся на уровне – 186–189 МПа, относительное удлинение – 4–5 %. С увеличением степени деформации и уменьшением диаметра проволоки до 3,6 мм механические свойства практически не изменяются. Максимальные прочностные свойства соответствуют проволоке с диаметром 2 мм – 198–202 МПа, при этом относительное удлинение составляет также 4 %. Удельное электрическое сопротивление проволоки удовлетворяет требованиям МЭК 62004–09.

Проволока из сплавов Al–0,33Zr–0,20Fe и Al–0,36Zr–0,20Fe по остаточному коэффициенту напряжения после нагрева не удовлетворяет только требованиям типа АТ4, а по механическим свойствам типу АТ2 (в исследуемых сплавах значения временного сопротивления разрыву находятся ниже требуемого уровня), табл. 2, 3.

Получение проволоки типа АТ4 с допустимой непрерывно действующей температурой эксплуатации 230 °C, возможно добиться повышением концентрации циркония, при условии его полногорстворения в твердом растворе, что позволит при термической обработке выделиться большему количеству дисперсной фазы Al₃Zr. Это приведет к более эффективному торможению рекристаллизационных процессов и повышению термической стабильности структуры и свойств деформированных полуфабрикатов. При этом нужно строго соблюдать температуру расплава и литья, скорость охлаждения, с целью предотвращения выделения первичных кристаллов Al₃Zr.

Таблица 2 – Результаты испытаний на термостойкость сплава Al–0,33Zr–0,20Fe

Диаметр проволоки, мм	Исходное состояние	Температура нагрева 230 °C (АТ1, АТ2)		Температура нагрева 280 °C (АТ3)		Температура нагрева 400 °C (АТ4)	
	σ_b , МПа	σ_b , МПа	остаточный коэффициент напряжения после нагрева, %	σ_b , МПа	остаточный коэффициент напряжения после нагрева, %	σ_b , МПа	остаточный коэффициент напряжения после нагрева, %
4	189	187	98,8	180	95,2	152	80,5
3,6	189	183	96,8	178	94,1	147	77,6
2	202	199	98,4	189	93,4	154	76,1

Таблица 3 – Результаты испытаний на термостойкость сплава Al–0,36Zr–0,20Fe

Диаметр проволоки, мм	Исходное состояние	Температура нагрева 230 °C (АТ1, АТ2)		Температура нагрева 280 °C (АТ3)		Температура нагрева 400 °C (АТ4)	
	σ_b , МПа	σ_b , МПа	остаточный коэффициент напряжения после нагрева, %	σ_b , МПа	остаточный коэффициент напряжения после нагрева, %	σ_b , МПа	остаточный коэффициент напряжения после нагрева, %
4,5	186	182	97,8	176	95,0	156	83,9
3,6	184	181	98,2	177	96,0	152	82,3
2	198	193	97,8	186	94,2	157	79,4

Далее проводили исследование микроструктуры проволоки всех диаметров в исходном холоднодеформированном состоянии и после нагревов до температур 230, 280 и 400 °C с выдержкой в течение 1 часа. Волочение катанки приводит к дроблению железосодержащих частиц пластинчатой формы. Сферические частицы

железосодержащих фаз не претерпевают существенных изменений при холодном волочении, они, как правило, располагаются равномерно по объему проволоки.

Анализ микроструктуры проволоки в деформированном состоянии и после термической обработки в поляризованном свете после нанесения оксидной пленки позволил установить, что нагрев до температур 230–400 °С не приводит к изменению зеренного строения, рис.1. Это свидетельствует о том, что при испытании термостойкости в проволоки типов АТ1–АТ4 рекристаллизационные процессы не идут.

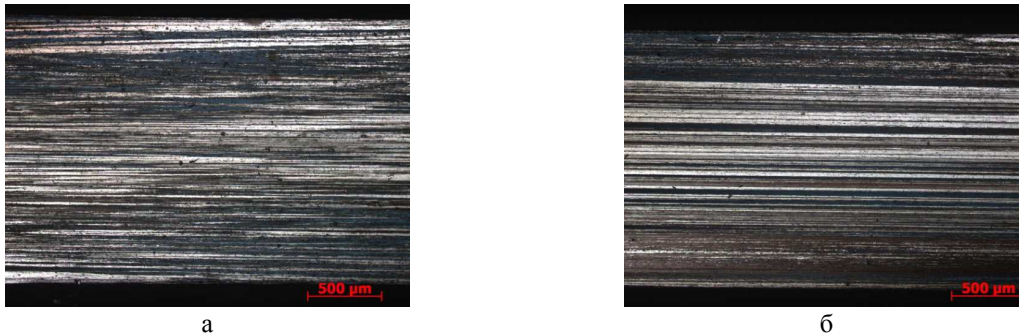


Рисунок 1 – Характерная микроструктура проволоки диаметром 2 мм в поляризованном свете после нагрева до 400 °С, выдержки 1 ч; охлаждения на воздухе, $\times 50$: а – сплав Al–0,33Zr–0,20Fe; б – сплав Al–0,36Zr–0,20Fe.

Выводы.

1. Проведенные испытания проволоки на термостойкость, показали, что исследуемые сплавы, удовлетворяют требованиям по типу проволоки АТ1 и АТ3 с максимально допустимой непрерывно действующей температурой эксплуатации 150 °С и 210 °С, соответственно. Остаточный коэффициент напряжения после нагрева по типу проволоки АТ4 находятся близко к требуемому уровню значений.

2. Микроструктура проволоки в продольном сечении из сплавов Al–0,33Zr–0,20Fe и Al–0,36Zr–0,20Fe имеет волокнистую структуру после нагрева до температур 230–400 °С и выдержки в течение 1 часа, это свидетельствует о том, что регламентированные в МЭК 62004–09 температуры испытаний проволоки из исследуемых сплавов находятся ниже температурного порога рекристаллизации.

3. Разработка новых алюминиевых сплавов, с различной концентрацией циркония, железа и других легирующих элементов, а также оптимизация режимов термической обработки, позволит добиться типа проволоки АТ4 и механических свойств проволоки типа АТ2.